

Д.А. Усанов

БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ
СКАНИРУЮЩАЯ
СВЧ-МИКРОСКОПИЯ
И ОБЛАСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Саратов
Издательство Саратовского университета
2010

УДК 620.179
ББК 22.336я73+28.071я73
У74

У74 **Усанов, Д.А.**
Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения / Д.А. Усанов. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. — 100 с.: ил.
ISBN 978-5-292-_____

В последние несколько десятилетий в практику вошли средства измерений, работающие в нанометровом масштабе: сканирующие туннельные, атомно-силовые и СВЧ-ближнеполевые микроскопы. В настоящем издании рассмотрены принципы действия, приведены основные характеристики, обсуждены достоинства и недостатки, приведены примеры применения различных типов ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов.

Для ученых, преподавателей и студентов, занимающихся исследованиями в области нано- и биомедицинских технологий.

Рецензенты:

УДК 620.179
ББК 22.336я73+28.071я73

ISBN 978-5-292-_____

© Усанов Д.А., 2010
© Саратовский государственный университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
<i>Глава 1.</i> Ближнеполевые СВЧ-микроскопы с зондами в виде волноводов с отверстиями и области их применения	8
<i>Глава 2.</i> Ближнеполевые СВЧ-микроскопы с коаксиальными зондами.....	32
<i>Глава 3.</i> Ближнеполевые СВЧ-микроскопы с зондами в виде магнитной петли связи	69
<i>Глава 4.</i> Ближнеполевые СВЧ-микроскопы с зондом в виде плоской линии передачи	72
<i>Глава 5.</i> Ближнеполевые СВЧ-микроскопы с зондовыми системами типа «петля связи — проволочный зонд», «металлический штырь с емкостным зазором».....	79
<i>Глава 6.</i> Применение ближнеполевой СВЧ-микроскопии в биологии и медицине.....	88
Заключение	99

ВВЕДЕНИЕ

При конструировании устройств твердотельной микро- и нанoeлектроники важно контролировать наличие дефектов и их локализацию в используемых при создании устройств материалов с возможно более высокой точностью и в короткое время. Такие перспективы открываются, в частности, при использовании ближнеполевой сканирующей СВЧ-микроскопии. Многие традиционные СВЧ-методы измерения параметров материалов и структур позволяют получить результат измерений, усредненный по размеру, сравнимому с длиной волны. Следствием такого усреднения было то, что на результат измерения могла влиять флуктуация параметров в сравнительно малой части исследуемого объекта, а при измерении параметров одного из слоев сложных структур могли влиять параметры других слоев. От такого рода ограничений свободны измерители (микроскопы), основанные на использовании эффекта ближнего поля.

Такие микроскопы позволяют проводить количественные измерения с высоким разрешением. Масштаб измеряемых размеров при их использовании не имеет жестких ограничений, связанных с частотой зондирующего поля. Результаты измерений с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа могут быть успешно использованы при изучении сверхпроводимости, эффектов, связанных с распространением спиновых волн, плазмонов, эффекта Джозефсона и т.д. Высокое разрешение ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов позволяет локализовать области дефектов в интегральной схеме. Авторы [1] предложили классификацию пяти основных типов ближнеполевых СВЧ-микроскопов, схематическое изображение которых приведено на рис. 1: *a*) СВЧ резонатор с отверстием в одной из стенок. Сдвиг частоты Δf и добротность фиксируются на мониторе; *b*) метод измерения по коэффициенту отражения R и прохождения T на конце или в линии передачи; *c*) метод измерения с использованием сканирующего резонатора; *d*) метод, основанный на использовании зонда с заостренным концом; *e*) *SQUID*-метод (сканирующий сверхпроводящий квантовый интерферометр).

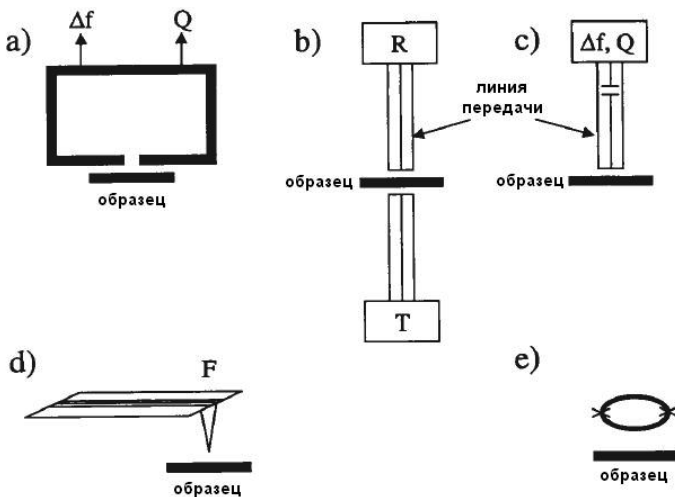


Рис. 1

Известна также модификация метода *a)*, в которой используется полусферический резонатор с плоским отражателем, имеющим отверстие для измерений. Общим моментом для всех типов ближнеполевых микроскопов с использованием резонатора является стремление связать резонатор с локальным участком исследуемого образца. Обобщенное рассмотрение принципов ближнеполевой СВЧ-микроскопии приведено в работе [2]. Характеризуя это направление измерительной техники, авторы [2] прежде всего отмечают то обстоятельство, что с помощью ближнеполевой СВЧ-микроскопии осуществляются количественно измерения параметров материалов применительно к размерам, намного меньшим длины измерения в свободном пространстве. Это особенно важно потому, что свойства материалов и многокомпонентных структур могут изменяться даже на протяжении единиц нанометров. Типичные размеры современных приборов имеют размеры также намного меньшие, чем те длины волн, на которых они работают. Авторы [2] высказали мнение о том, что для измерений с помощью ближнеполевых СВЧ-микроскопов предпочтительным является использование методов, основанных на применении сравнения с эталонными образцами.

В основе работы ближнеполевого СВЧ-микроскопа лежит использование взаимодействия волн с высокой пространственной частотой, образующих ближнее поле, с исследуемым образцом. Авторы [2] выделили как наиболее часто используемые следующие конструкции зондов (рис. 2): *a*) зонд, образованный апертурой (отверстием) в непрозрачном экране; *b*) зонд, образованный проводящим заостренным стержнем (им может быть зонд сканирующего электронного микроскопа); *c*) зонд атомно-силового микроскопа; *d, e*) открытый невыступающий конец линии передачи; *f*) магнитная петля связи.

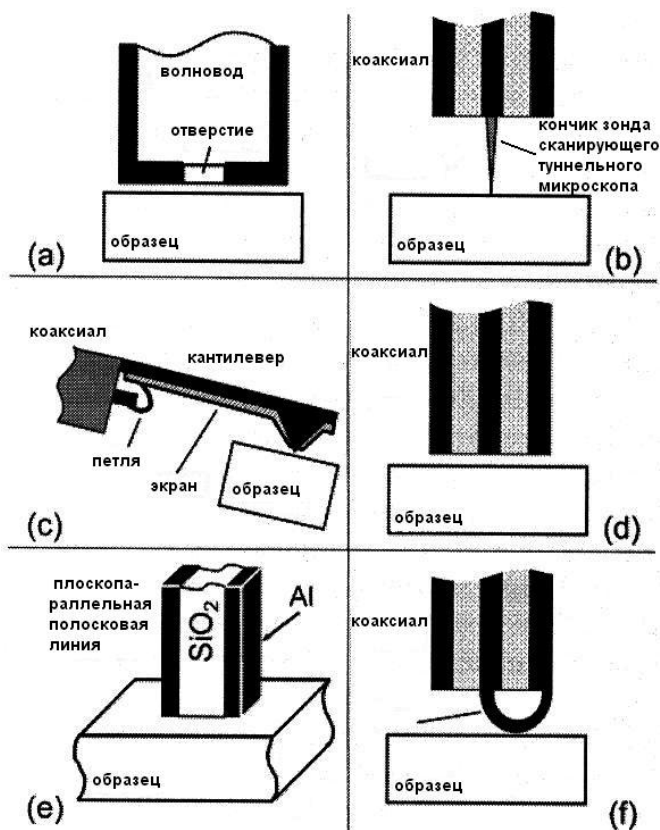


Рис. 2

Авторы [2] отмечали тот факт, что в ближней зоне электромагнитные поля не являются поперечными. Эти поля экспоненциально затухают по мере удаления от источника на расстоянии $\sim D$, где D — характерный размер зонда или апертуры. Изменение этого поля происходит при внесении в него исследуемого образца и фиксируется детектирующей системой микроскопа. Для того чтобы взаимодействие образца с ближним полем было эффективным, должно выполняться условие:

$$k = \omega(\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu) \frac{1}{2} D \ll 1,$$

где k — комплексное волновое число для исследуемого материала, $\epsilon_0 \mu_0$ — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, $\epsilon \mu$ — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала.

Авторы [2] отмечали как достоинство ближнеполевой СВЧ-микроскопии по сравнению с аналогичной оптической то, что при взаимодействии оптического излучения с материалом могут проявляться квантовые эффекты, затрудняющие анализ результатов измерений. В СВЧ-диапазоне этот фактор менее существен. Обсуждая проблему выбора расстояния между зондом и образцом, авторы [2] привели эмпирически установленное соотношение: это расстояние должно быть меньше 1/10 от диаметра кончика зонда D .

Список литературы

1. *Anlage S.M., Steinhauer D.E., Feenstra B.J., Vlahacos C.P., Wellstood F.C.* Near-field microwave microscopy of materials properties // *Microwave Superconductivity*. Amsterdam: Kluwer, 2001. P. 239–269.
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*. N.Y.: Springer-Verlag, 2007. V. 1. P. 215–253.

ГЛАВА 1. БЛИЖНЕПОЛЕВЫЕ СВЧ-МИКРОСКОПЫ С ЗОНДАМИ В ВИДЕ ВОЛНОВОДОВ С ОТВЕРСТИЯМИ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Радиоволновые методы неразрушающего контроля уже многие десятилетия занимают свою нишу среди других методов неразрушающего контроля [1]. Волноводные методы являются одной из разновидностей радиоволновых [2]. Они интересны возможностью сравнительно простого теоретического описания характеристик волны, взаимодействующей с исследуемым объектом. Теоретическое описание такого взаимодействия открывает возможность определения искомых параметров исследуемого объекта в результате решения соответствующей обратной задачи [3]. К известным недостаткам радиоволновых методов измерения, принцип действия которых основан на использовании распространяющихся в волноводе волн (волн основного типа), относится низкая локальность измерений, соизмеримая с длиной распространяющейся волны, относительно невысокая чувствительность к изменению искомых параметров в случаях, когда возможно строгое математическое описание взаимодействия волны с исследуемым объектом. Ситуация кардинально изменяется, если используются системы, в которых с исследуемым объектом взаимодействует ближнее СВЧ-поле, например сосредоточенное в области измерительного отверстия в короткозамыкателе прямоугольного волновода или в стенке резонатора. Если исследуемый образец расположен в таких системах в непосредственной близости от отверстия, то он взаимодействует с зоной так называемого ближнего поля, в значительной степени образованного нераспространяющимися типами волн. В этом случае локальность измерений по сравнению с традиционно используемыми системами удается повысить в десятки и сотни раз. Повышение локальности связано с тем, что длины волн высших типов значительно меньше длины волны основного типа колебаний.

Авторы [4] относят к одной из разновидностей ближнеполевых СВЧ-микроскопов устройство на основе СВЧ-резонатора с небольшим отверстием в одной из их стенок. Диаметр отверстия в такой зондовой головке составлял ~ 0.5 мм. Приближение исследуемого образца к отверстию приводило к сдвигу частоты и изменению добротности резонатора, по значениям которых и определяли искомые параме-

тры измерительных образцов. Авторы [5], используя в качестве источника ближнего поля тонкую диафрагму с отверстием диаметром 3 мм, являющуюся составной частью открытого резонатора, на частоте генерации 10 ГГц достигли четкого разрешения элементов металлической решетки с шириной отдельного элемента 0.5 мм. Схема микроскопа с таким зондом приведена на рис. 1.1.

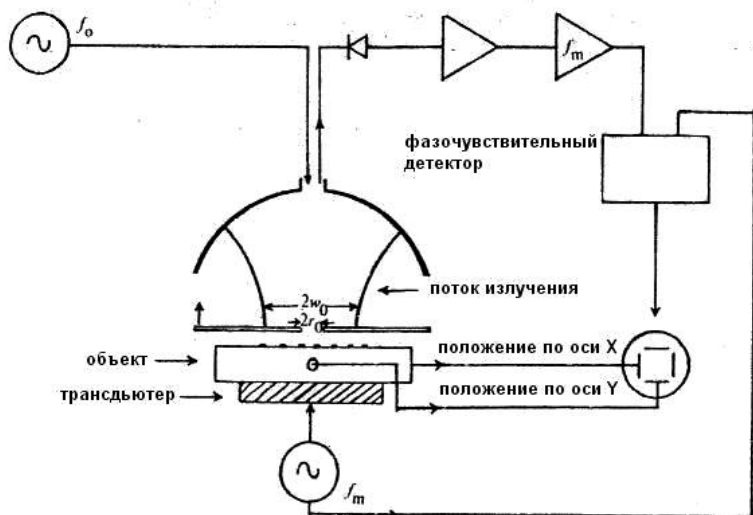


Рис. 1.1

Радиус кривизны резонатора составлял 10 см. Для повышения точности измерения использовался режим модуляции резонансной частоты f_0 . Модуляция частоты обеспечивалась расположением исследуемого объекта на вибраторе, размещенном на столике, который мог перемещаться вдоль двух координат: x и y . Приемная часть микроскопа включала в себя детектор, малошумящий усилитель, настроенный на частоту модуляции f_m , и фазовый детектор, соединенный с эталоном акустического генератора.

На рис. 1.2 приведено изображение букв, полученное с помощью этого микроскопа, и их оригиналы. Ширина букв составляла 2 мм. С помощью этого микроскопа удалось четко разрешить границу между двумя диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_L = 2.58$ и $\epsilon_L = 2.24$ (рис. 1.3).

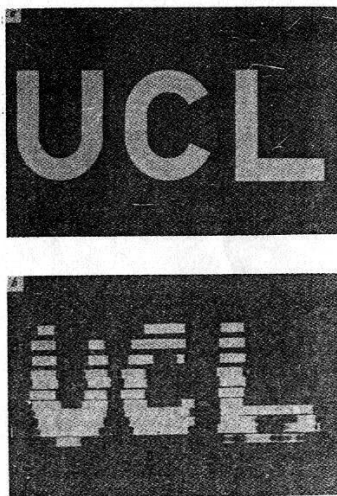


Рис. 1.2

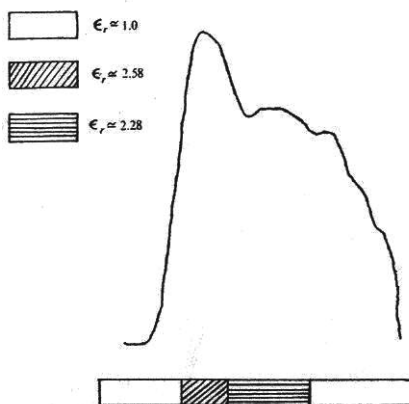


Рис. 1.3

Ближнеполевые микроскопы могут создаваться и на основе нерезонансных систем. В таких микроскопах исследуемый образец может размещаться, например, на конце или вблизи конца разомкнутой линии передачи. О свойствах образца в этом случае судят по коэффициенту отражения или поглощения. В качестве такой линии часто используют коаксиальную линию. Могут быть использованы также волновод с резонансной щелью или микрополосковая линия. Возможна комбинация описанных выше типов микроскопов, когда разомкнутая линия подключена к резонатору. Такие микроскопы являются более информативными. В ближнеполевых СВЧ-микроскопах используют режим работы, когда в качестве зондирующего фигурирует поле нераспространяющегося типа волны. В качестве источника такого излучения можно использовать, в частности, цилиндрический волновод уменьшенного поперечного сечения (запредельный волновод). Затухание волны в таком волноводе происходит на расстоянии, примерно равном диаметру волновода. Недостатком таких микроскопов является характерное для них высокое отражение сигнала и вследствие этого малая амплитуда зондирующего сигнала. Достоинством использования нераспространяющихся типов волн является то, что они, хотя и затухают на малом расстоянии, но позволяют получить высокое разрешение.

Авторы [6] отмечали, что при сочетании датчика с резонансной системой с целью повышения чувствительности, ухудшаются его частотные характеристики. Он становится избирательным по частоте. Чтобы избежать этого, авторы [6] предложили использовать в качестве сканирующего зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа суживающийся по высоте отрезок прямоугольного волновода. В предложенном ими микроскопе использовался измеритель, работающий в миллиметровом диапазоне длин волн. Этот микроскоп позволял проводить измерения в более широкой полосе, чем резонансные. Схемы микроскопа и датчика приведены на рис. 1.4.

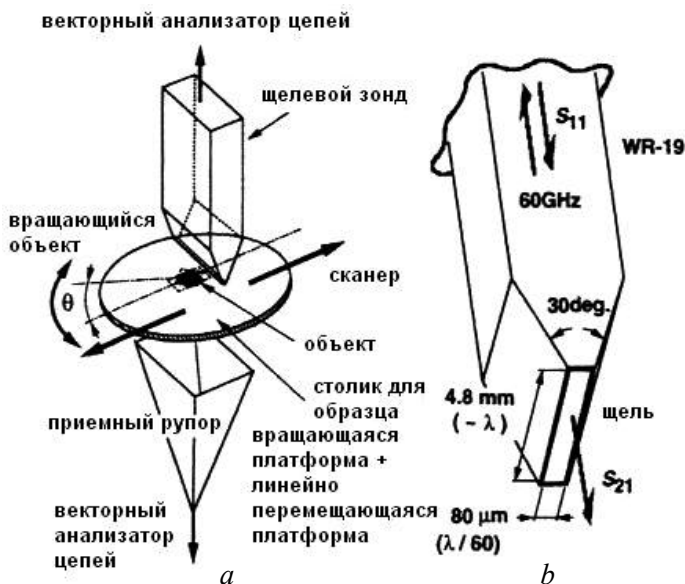


Рис. 1.4

Конусообразную часть датчика можно рассматривать как последовательности волноводов с различными высотами. При этом размеры выбирались таким образом, чтобы выходной импеданс совпадал с импедансом свободного пространства. Достоинством используемого зонда, по мнению авторов [6], является высокий коэффициент прохождения волны к излучающему отверстию даже при чрезвычайно малой ширине щели. По сравнению с датчиком на основе резонансной ди-

афрагмы [7], этот датчик Φ_r может работать в широкой полосе частот. Рабочая частота датчика [6] равнялась 60 ГГц, ширина щели — 80 мкм ($\lambda/60$, где λ — длина волны). Сканирование осуществлялось с помощью вращающегося и линейно перемещающегося столиков. Перемещение реализовывалось с помощью шагового двигателя, обеспечивающего шаг от 200 мкм. Доступное разрешение металлических площадок составляло 110 мкм. Предложенный микроскоп был использован для визуализации фотовозбужденных носителей заряда в слое кремния толщиной 1,2 мкм на кварцевой подложке. Площадь подложки, на которой возникали фотовозбужденные носители заряда, составляла 0.25мм^2 . Плотность генерируемых носителей заряда была 10^{17}см^{-3} .

Авторы [8] с целью уменьшения флуктуаций, связанных с отражением от поверхности, на которой располагается исследуемый объект, ввели в ближнеполевой СВЧ-микроскоп, работающий в миллиметровом диапазоне длин волн, конструкцию зондовой части которого описана в [6], дополнительное устройство. Это устройство представляет собой полусферическую линзу с антиотражающим слоем, покрывающим сферическую поверхность. Предложенное устройство служит также для ослабления вклада в результирующий сигнал составляющей, связанной с полем распространяющейся волны.

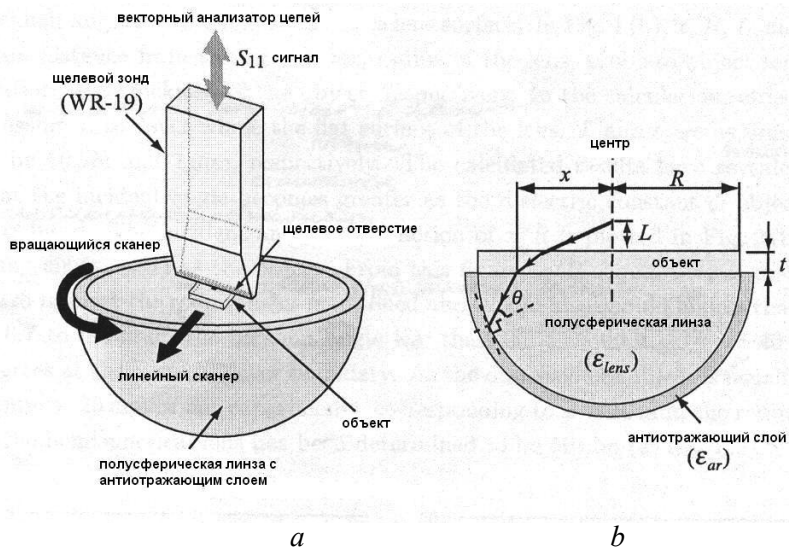


Рис. 1.5

На рис. 1.5 представлена конструкция микроскопа и поперечное сечение дополнительного устройства. Рабочая частота микроскопа составляла ~ 60 ГГц. В качестве зонда так же, как и в [6], использовался суживающийся на конце прямоугольный волновод. Сечение открытого конца волновода составляло $4.8 \text{ мм} \times 80 \text{ мкм}$. Расстояние между таким зондом и исследуемым объектом поддерживалось на уровне $\sim 10 \text{ мкм}$. В качестве материала линзы использовалась разновидность боросиликатного стекла с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 6.19 - j0.01$. Диэлектрическая проницаемость антиотражающего слоя, в качестве материала которого использовался полиметилметакрилат, составляла $\varepsilon = 2.56 - j0.03$. Толщина слоя выбиралась равной 2.4 мм .

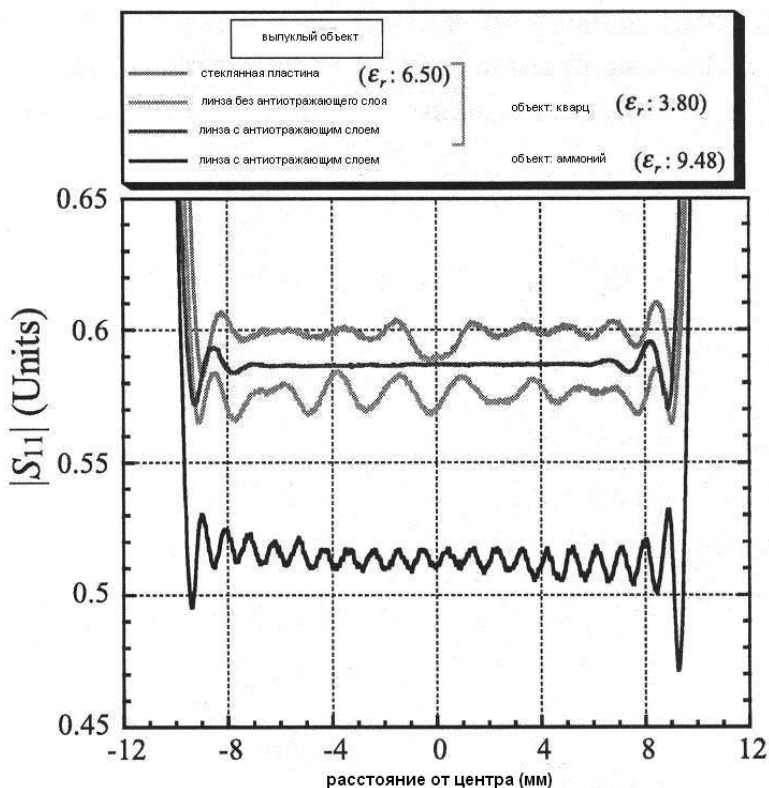


Рис. 1.6

На рис. 1.6 приведены результаты одномерного сканирования однородной кварцевой пластины с размерами поперечного сечения 20 мм x 20 мм, толщиной 1 мм ($\epsilon_r = 3.8$), установленной на пластине с $\epsilon_r = 6.50$ сечением 70 мм x 70 мм, 5 мм толщины с линзой с антиотражающим слоем и с линзой без антиотражающего слоя, и слоя окиси алюминия ($\epsilon_r = 9.48$) с размерами 20 мм x 20 мм. Из приведенных на этом рисунке результатов следует, что, когда исследуемый объект устанавливается на предложенное устройство, нежелательные флуктуации сигнала полностью исчезают, если диэлектрическая проницаемость объекта меньше, чем у материала линзы. Чувствительность определения ϵ_r с помощью описанного микроскопа составляла $\Delta\epsilon/\epsilon \sim 3.10^{-4}$.

Роль резонатора в ближнеполевом СВЧ-микроскопе, предложенном авторами [9], выполняла резонансная диаграмма, устанавливаемая на конце прямоугольного волновода (рис. 1.7) и перекрывающая его поперечное сечение.

Отверстие в диафрагме представляло собой узкую щель шириной b' и длиной a' , вырезанную в тонкой проводящей пластине вдоль ее широкой стороны (рис. 1.8). При выполнении условия

$$\frac{a}{b} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} = \frac{a'}{b'} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a'}\right)^2}$$

щель становится «прозрачной» для излучения. Здесь a и b — размеры широкой и узкой стенки волновода соответственно, a' и b' — размеры щели, λ — длина волны. Если такого рода зонд разместить вблизи проводящей поверхности, то коэффициент отражения в волноводе будет сильно зависеть от сопротивления поверхности под зондом. Измеряя амплитуду и фазу отраженной волны и сканируя зонд, можно определить профиль сопротивления поверхности. По сравнению с зондом, в котором используется круглое отверстие в диафрагме, зонд с щелевым отверстием характеризуется высоким пропусканием излучения (в определенной полосе частот), а следовательно, большей связью с измеряемым объектом и большей чувствительностью системы. Такого рода резонансная система имеет сравнительно невысокую добротность и относительно широкую полосу рабочих частот. Разрешение резонансного щелевого зонда в направлении, перпендикуляр-

ном щели, определяется шириной щели и глубиной скин-слоя материала, в котором эта щель вырезана. Схема ближнеполевого микроскопа с щелевым зондом приведена на рис. 1.9.

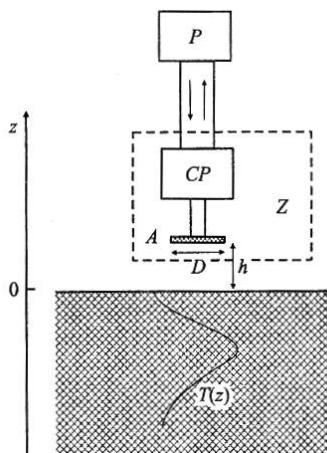


Рис. 1.7

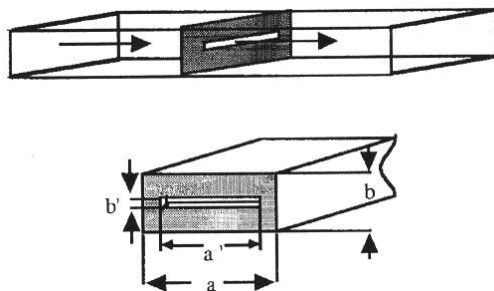


Рис. 1.8

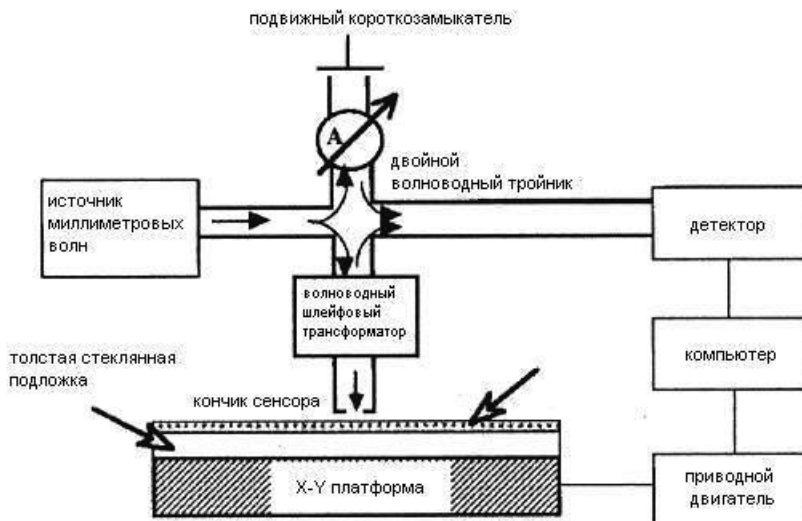


Рис. 1.9

В его состав входит генератор миллиметрового диапазона и Е-Н мост. Щель вырезана в алюминиевой фольге толщиной 20 мкм, ее размеры составляли 1.5 x 0.1 мм², частота резонанса — 80 ГГц. В отсутствии измеряемого образца мост приведен в состояние баланса. Исследуемый образец помещается на Х-У подставку, которая движется под зондом, находясь на постоянном расстоянии от него из интервала 50÷100 мкм. Если проводимость или диэлектрическая проницаемость под зондом изменяется, то мост разбалансируется. Сигнал разбаланса фиксируется детектором и усиливается. Используемые при измерении образцы представляли собой разделенные щелями металлические полоски, нанесенные на диэлектрическое основание (рис. 1.10).

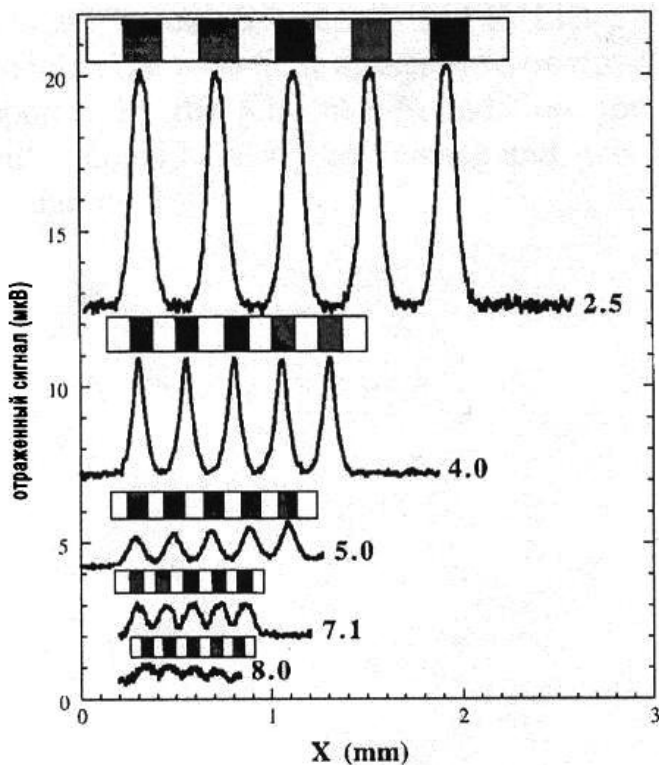


Рис. 1.10

Было установлено, что с помощью такого типа зонда с шириной щели (b') в 100 мкм хорошо разрешаются 5 и даже 8 (при $b' + 3$ мкм) полосок на одном миллиметре.

Одним из требований, выполнение которых необходимо для расширения диапазона измеряемых с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа толщин металлических пленок, является низкий импеданс зонда. Такой зонд предложили авторы [10]. Этот зонд представлял собой комбинацию диэлектрического резонатора с резонансной щелью в стенке волновода. Для уменьшения размеров щели и тем самым обеспечения возможности измерений с высоким пространственным разрешением в качестве волновода использовался круглый, заполненный диэлектриком волновод. Роль диэлектрического резонатора выполнял отрезок такого волновода. В эксперименте использовался зонд с фронтальным концом сферической формы (рис. 1.11).

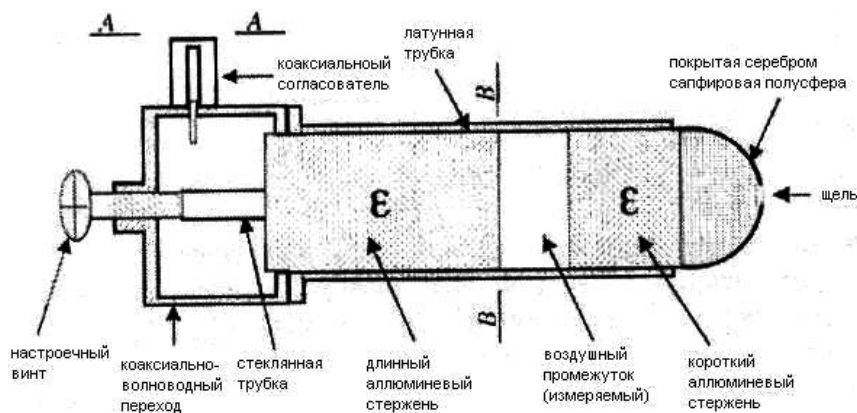


Рис. 1.11

Сапфировая полусфера вырезалась из сапфировой шарообразной линзы диаметром 2.5 мм. Полусфера покрывалась серебром, в ее центре оставлялась узкая щель. Частота отсечки цилиндрического волновода составляла 22.6 ГГц. Схема микроскопа показана на рис. 1.12.

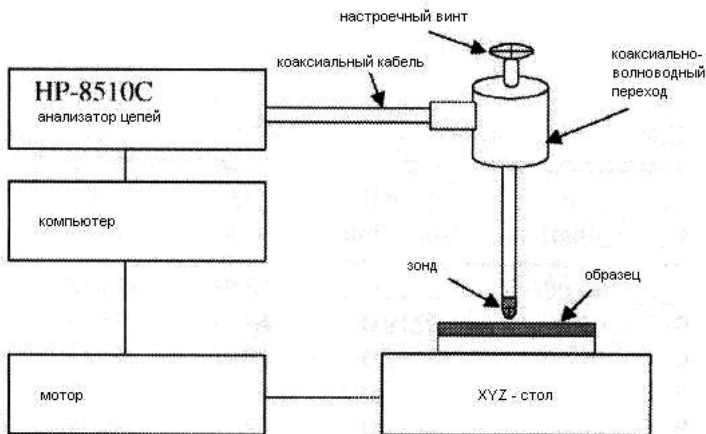


Рис. 1.12

Образец размещался на трехкоординатный столик. Для настройки использовался регулировочный винт, с помощью которого можно было управлять глубиной и положением минимума отражения. Резонансная частота находилась в диапазоне 25–30 ГГц, нагруженная добротность составляла величину из интервала 70÷100. При введении в контур высокопроводящего образца резонансная частота уменьшалась на 5–10 МГц, а добротность увеличивалась до 120–150. Пространственное разрешение определялось шириной щели и было заключено в интервале от 30 до 0.5 мкм.

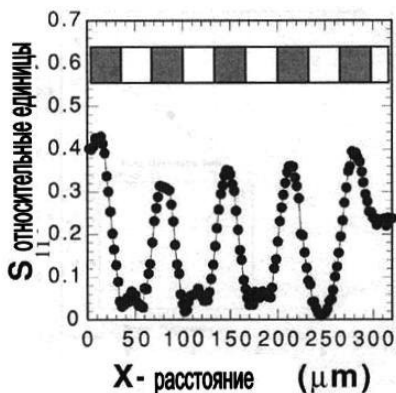


Рис. 1.13

Рис.1.13 демонстрирует хорошее разрешение с помощью описанного микроскопа пяти полосок из хрома шириной в 32 мкм, нанесенных на стеклянную подложку. Наибольшее пространственное разрешение достигалось при движении зонда в направлении, перпендикулярном щели.

Авторы [11] предложили использовать ближнеполевой СВЧ-микроскоп с щелевым зондом для определения электрической анизотропии свойств исследуемого образца. Такая возможность является следствием чувствительности щелевого зонда только для одного направления в образце, совпадающего с поляризацией электрической компоненты поля в щели. Экспериментальные результаты авторы [11] получили на частоте 60 ГГц. Схематическое изображение предложенного микроскопа приведено на рис. 1.14.

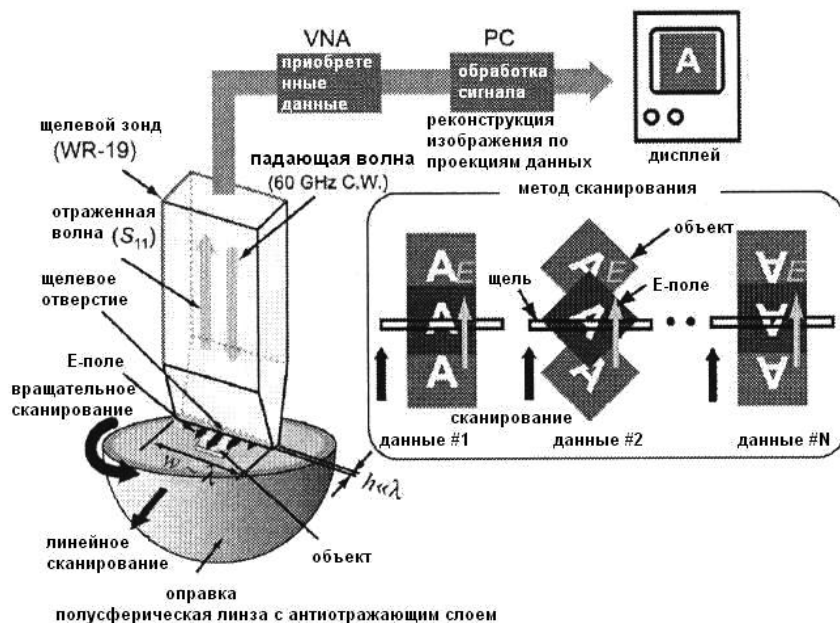


Рис. 1.14

Зонд представлял собой волновод с щелевой апертурой на конце шириной 4.8 мм, высотой 80 мкм. Расстояние от зонда до исследуемого образца поддерживалось на уровне 10 мкм. Исследуемый объект размещался на предметном столике, содержащем полусферическую стеклянную линзу и антиотражающий слой для уменьшения нежелательных флуктуаций, вызванных поверхностными волнами в объекте и отражением от столика. Для определения анизотропии исследуемый

объект линейно сканировался при различных углах поворота с помощью сканера, использующего шаговый электропривод. Выполненные эксперименты свидетельствуют о возможности фиксации электрической анизотропии проволоочной решетки с пространственным разрешением лучшим, чем $1/10$ длины волны излучения.

Авторами [12] была исследована возможность использования в качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа короткозамкнутого отрезка прямоугольного волновода с круглым отверстием в короткозамкнате. Схема установки, использовавшейся авторами [12], приведена на рис.1.15.

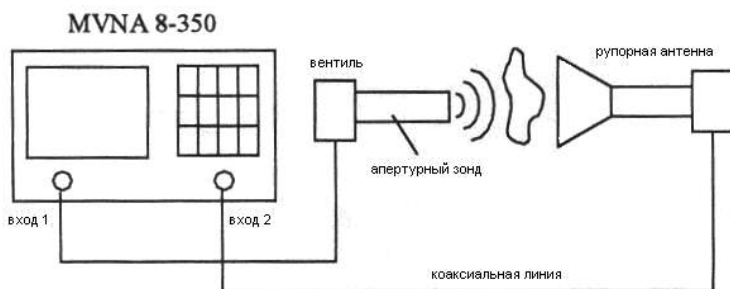


Рис. 1.15

Использовался волновод, предназначенный для работы в полосе частот 50–75 ГГц (рис. 1.16).

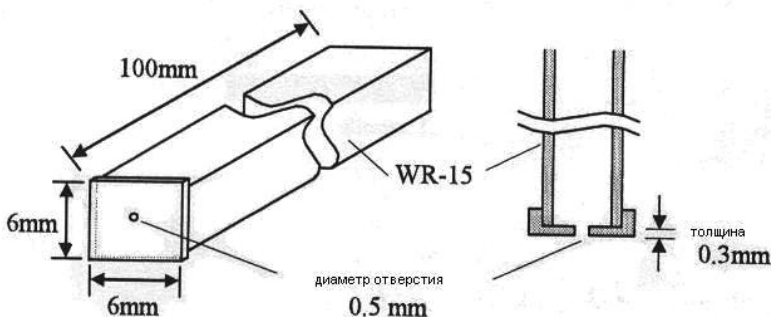


Рис. 1.16

Длина отрезка волновода составляла 100 мм.

Поперечные размеры короткозамыкающей пластины толщиной 0,3 мм составляли 6×6 мм, диаметр отверстия — 0,5 мм. Сечение волновода составляло 3,75×1,88 мм. На рис. 1.17 приведено изображение волноводного зонда.

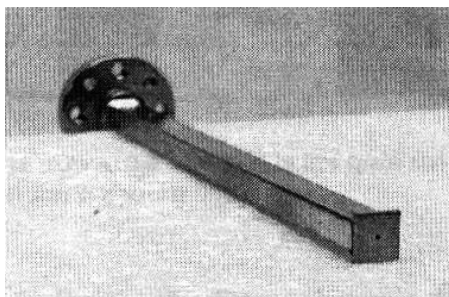


Рис. 1.17

В результате моделирования и расчетов авторами [12] показано, что в большей части свободного пространства поле на выходе из отверстия сохраняет поляризацию, характерную для волновода, в направлении распространения волны. Результаты моделирования распределения интенсивности поля на выходе из отверстия для свободного пространства и тефлона показаны соответственно на рис. 1.18, *a* и *b*.

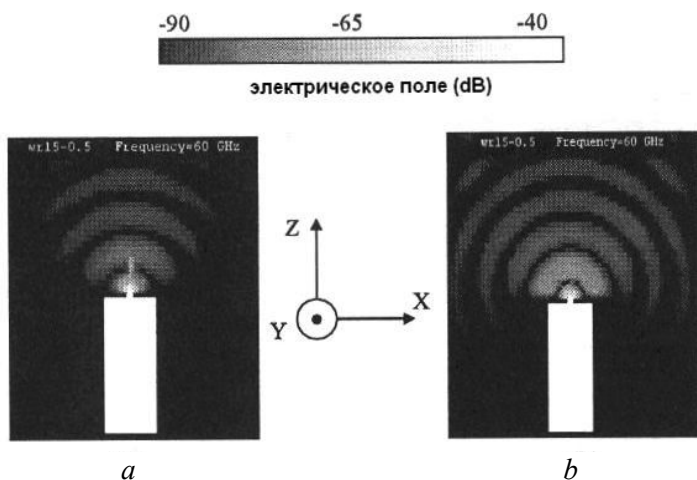


Рис. 1.18

Для оценки разрешающей способности зонда при моделировании использовалась схема, приведенная на рис. 1.19. В качестве ис-

следующего образца использовался лист из тефлона с размерами $15 \times 10 \times 1$ мм с воздушной щелью размером в 1 мм (рис.1.20).

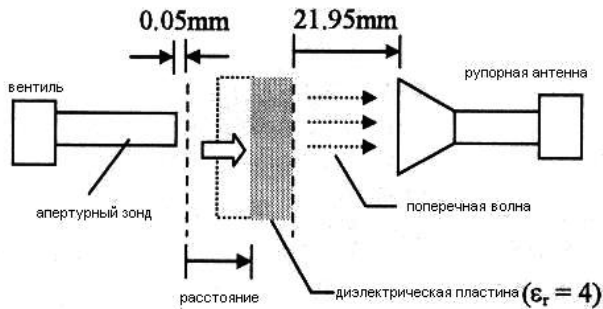


Рис. 1.19



Рис. 1.20

Предполагалось, что образец вплотную, с зазором не более 0,05 мм, приближен к отверстию. В качестве рабочей частоты задавалась частота 60 ГГц. Результаты расчета приведены на рис.1.21. Приведенные результаты расчета распределения амплитуды и фазы иллюстрируют изменение этих параметров в области щели.

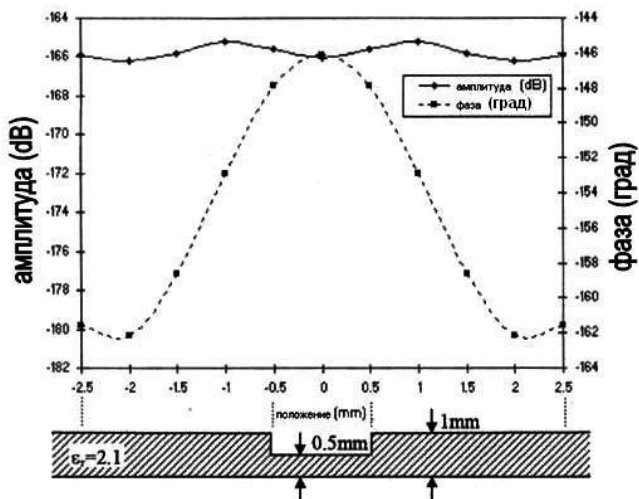


Рис. 1.21

Для демонстрации разрешающей способности метода сканировался листовой диэлектрик (тефлон) с двумя щелями в нем, каждая из которых имела ширину 1 мм (рис.1.22). Интервал между щелями и толщина листа из тефлона составляли также 1 мм. Шаг сканирования составлял 0,05 мм.

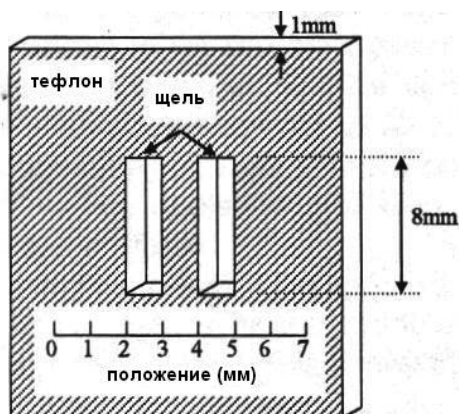


Рис. 1.22

Результаты измерений приведены на рис.1.23. Таким образом продемонстрирована разрешающая способность, более высокая, чем длина волны излучения.

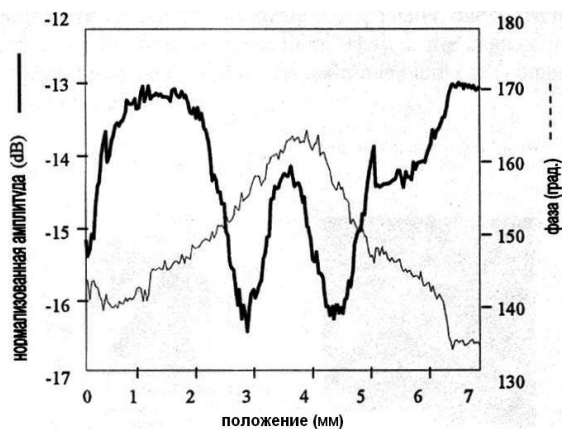


Рис. 1.23

Для иллюстрации возможности определения положения паза сложной формы авторы [12] использовали образец из тефлона (толщина 1 мк), в котором был выполнен паз в виде буквы N, размеры которого показаны на рис.1.24, (a). Изображение используемого устройства приведено на рис.1.24, (b).

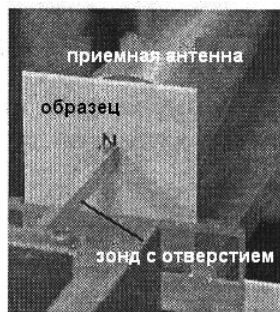
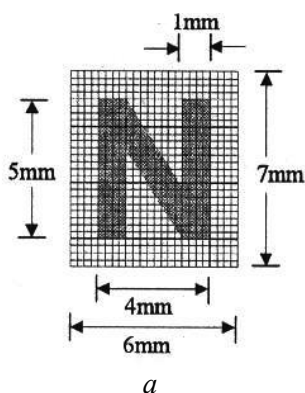


Рис. 1.24

Результаты измерений приведены на рис. 1.25.

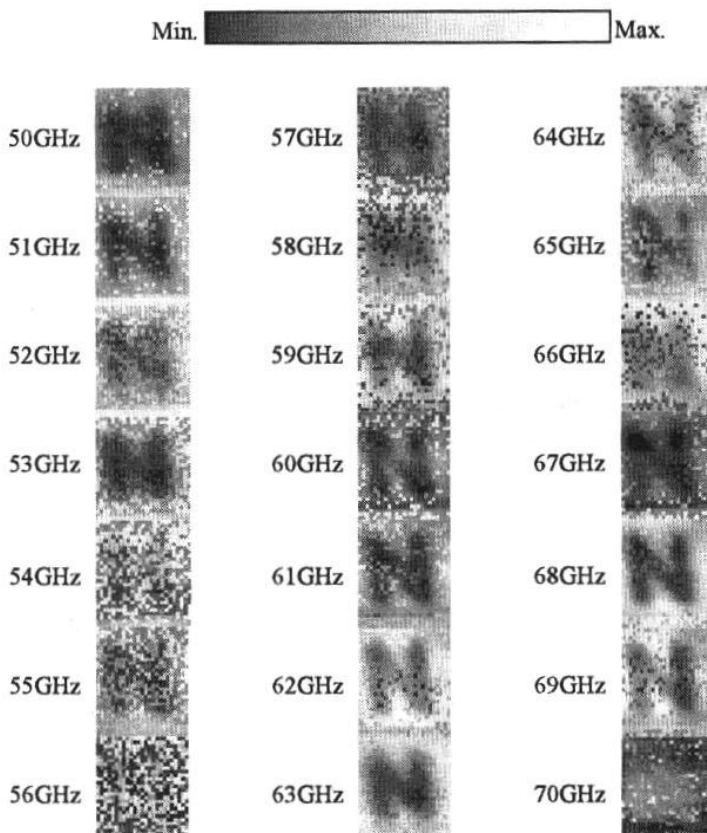


Рис. 1.25

Из приведенных результатов следует, что изображения на частотах 50–53 ГГц и 57–69 ГГц легко распознать, наилучший контраст был получен на частоте 68 ГГц.

Конструкция волноводного зонда с отверстием в короткозамыкателе с рабочими частотами из диапазона 52–73 ГГц была предложена авторами [12] в 2000 году. Отличием этого зонда от известных было то, что короткозамыкатель с отверстием выполнял функцию одной из стенок низкоразмерного резонатора.

При конструировании различных типов волноводных устройств размеры сечения волноводов обычно выбирают таким образом, чтобы в них было возможно распространение волны только основного типа (H_{10}). Если в таких волноводах имеются другие конструктивные элементы, например металлические стержни, диафрагмы с отверстием, то в их окрестности возбуждаются быстро затухающие волны высших типов.

В работе [13] показано, что если ёмкостную диафрагму разместить в волноводе на расстоянии около $\lambda_B/100$ от короткозамыкателя, где λ_B — длина волны основного типа, то на определённых частотах наблюдается резонансное поглощение мощности. Частоты резонансов зависят от расстояния от диафрагмы до короткозамыкателя. Наблюдающиеся резонансы объясняются тем, что на расстояниях около $\lambda_B/100$ возникающие на отверстии в диафрагме высшие типы волн, вклад которых в импеданс носит индуктивный характер, не успевают затухнуть. В результате оказывается возможным выполнение условий резонанса в колебательном контуре, образованном ёмкостной диафрагмой и короткозамыкателем, то есть в этом случае ёмкостная диафрагма с короткозамыкателем представляет собой резонатор. Очевидным достоинством такого резонатора являются его малые габариты.

Известно применение СВЧ-резонаторов для измерения параметров диэлектрических и полупроводниковых материалов. Так как описанный выше резонатор отличается от известных волноводных резонаторов существенно меньшими габаритами, то его можно использовать для измерения характеристик веществ, например, диэлектрической проницаемости и проводимости в малом объёме.

Авторами [13] была определена взаимосвязь конструктивных размеров резонатора (размеров щели, положения измерительного отверстия связи) с чувствительностью его характеристик к изменению параметров вводимого в него вещества. При проведении экспериментальных исследований использовался резонатор, размеры поперечного сечения которого составляли $3.6 \times 1.8 \text{ мм}^2$ (рис. 1.26).

Измерительное отверстие связи диаметром 0.4 мм располагалось в короткозамыкающем поршне, как это показано на рис. 1.26. Короткозамыкающий поршень с отверстием располагался на расстоянии около 100 мкм от диафрагмы со щелью. Были проведены измерения

коэффициента стоячей волны ($K_{ст} U$) в полосе частот для различного местоположения измерительного отверстия в короткозамыкателе.

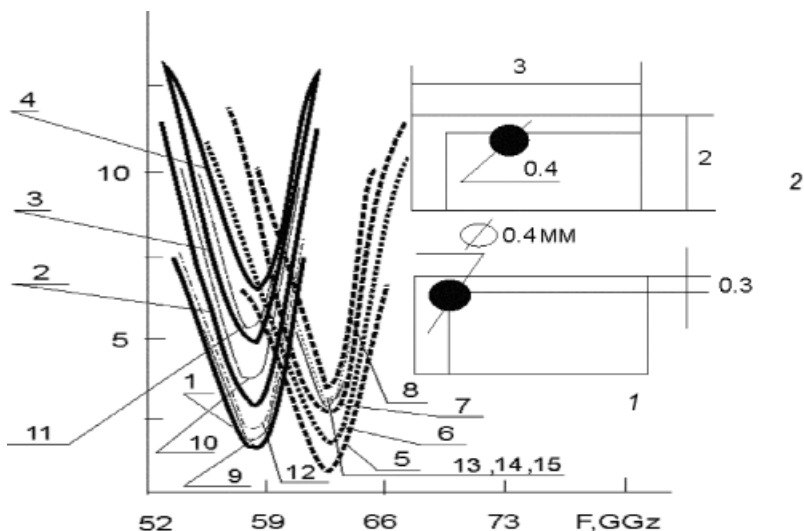


Рис. 1.26

Плоские образцы из материалов с различными значениями диэлектрической проницаемости и проводимости размещались на плоскости короткозамыкателя с отверстием с внешней его стороны (см. рис. 1.26, вставка 1). Толщина используемых в экспериментах образцов не превышала 100 мкм. Результаты измерений зависимости $K_{ст} U$ от частоты F для случаев, когда диэлектрическая проницаемость образцов из диэлектриков равнялась 2.2 (фторопласт), 9.8 (поликор), 15 (стекло), приведены на рис.1.26 (кривые 1–3 соответственно). Кривая 4 соответствует случаю, когда образец на торце короткозамыкателя отсутствует. Эти результаты свидетельствуют о том, что для фиксированной частоты существует однозначное соответствие между величиной $K_{ст} U$ и значением диэлектрической проницаемости образцов из различных материалов. Проведённые измерения зависимости $K_{ст} U$ от F для образцов из тех же материалов, но с толщинами, большими 100 мкм, показали, что эти зависимости для образцов разной толщины остаются практически неизменными.

Представляет интерес исследование возможности использования предложенного резонатора для измерения проводимости полупроводниковых материалов, которая может изменяться в широких пределах. Отметим, что для наиболее часто употребляемых на практике полупроводников Ge, Si, GaAs диэлектрическая проницаемость решётки равна соответственно 16.0; 11.9; 12.85.

В результате проведённых исследований было найдено местоположение измерительного отверстия, показанное на вставке 2 к рис.1.26, при котором наблюдается однозначное соответствие между величиной $K_{\text{ст}} U$ и значением проводимости полупроводника. На рис.1.26 приведены результаты измерений для этого случая зависимости $K_{\text{ст}} U$ от F , полученные при расположении на плоскости короткозамыкателя с внешней его стороны плоских образцов из Ge p -типа с проводимостями $\sigma = 0.5; 0.2; 0.02$ (Ом \times см) $^{-1}$ (соответственно кривые 5–7), расстояние между диафрагмой и короткозамыкающим поршнем при этом устанавливалось равным 80 мкм. Кривая 8 соответствует случаю, когда полупроводниковый образец на торце короткозамыкателя отсутствует. Из результатов измерений следует также, что если для такого местоположения измерительного отверстия на короткозамыкателе располагать диэлектрические образцы с различным значением ϵ , то при $\epsilon > 2$ зависимости $K_{\text{ст}} U$ от F становятся практически неразличимыми (кривая 9 для $\epsilon = 2.2; \epsilon = 9.8; \epsilon = 15$).

В то же время, как это следует из результатов проведённых измерений зависимости $K_{\text{ст}} U$ от F , если полупроводниковые образцы располагать на короткозамыкателе с отверстием, расположенным как это показано на вставке 1 к рис.1.26, то для фиксированных значений F зависимость $K_{\text{ст}} U$ от σ носит немонотонный характер. Отметим, что для полупроводниковых образцов так же, как и для диэлектрических, не было обнаружено изменения зависимости $K_{\text{ст}} U$ от F при изменении толщины образцов, начиная со 100 мкм и выше.

Предложенная конструкция резонатора позволяет измерять неоднородность ϵ или σ по площади образца, перемещая его относительно измерительного отверстия, которое имеет сравнительно небольшой диаметр (0.4 мм). Диаметр отверстия ограничивает минимальный размер площадки, по которой можно определять усреднённое значение искомых параметров. Как следует из приведённых

выше результатов, с помощью предложенного резонатора можно проводить измерения свойств материалов в коротковолновой части СВЧ-диапазона. При проведении измерений с помощью такого резонатора предполагается предварительное проведение калибровочных измерений зависимости $K_{ст} U$ от F с использованием образцов с известными значениями ϵ и σ , либо эти зависимости для различных ϵ и σ должны быть определены из результатов расчётов.

Таким образом, авторами [13] показано, что предложенный измерительный резонатор может быть использован для измерения на СВЧ, в том числе в коротковолновой части СВЧ-диапазона, диэлектрической проницаемости и проводимости материалов малых объёмов.

Авторы [14] предложили использовать эффект ближнего поля для измерения шероховатости металлических поверхностей, оговорив максимальное расстояние между возбуждающим ближнее поле металлическим штырем с зазором, установленным вблизи открытого конца волновода, и короткозамыкающей поверхностью с измеряемой шероховатостью. Принцип действия устройства основан на использовании установленного авторами [15] резонанса, наблюдающегося при расположении металлического стержня с емкостным зазором вблизи от короткозамыкающей волновод металлической поверхности. Ясно, что характеристики резонанса в такой системе должны зависеть от параметров поверхности короткозамыкателя. Именно это свойство и использовали авторы [14] для измерения шероховатости поверхности металлических образцов, выполняющих функцию короткозамыкателя. Схематическое изображение конструкции устройства приведено на рис.1.27. Устройство состоит из отрезка прямоугольного волновода 1, разомкнутого на одном конце, расположенного в волноводе источника СВЧ-колебаний 2, а также детектора 3 и двух соосных металлических стержней 4 и 5, выполненных с возможностью перемещения вдоль своей оси и вдоль продольных щелей 6 и 7, расположенных по оси волновода у его разомкнутого конца, выполняющего роль зондирующего отверстия. Такое расположение стержней позволяет настраивать систему на максимальную чувствительность подобно тому, как это было описано авторами [16]. Стержни фиксируются в рабочем положении с помощью скобы, к детектору подключен регистрирующий прибор 9.

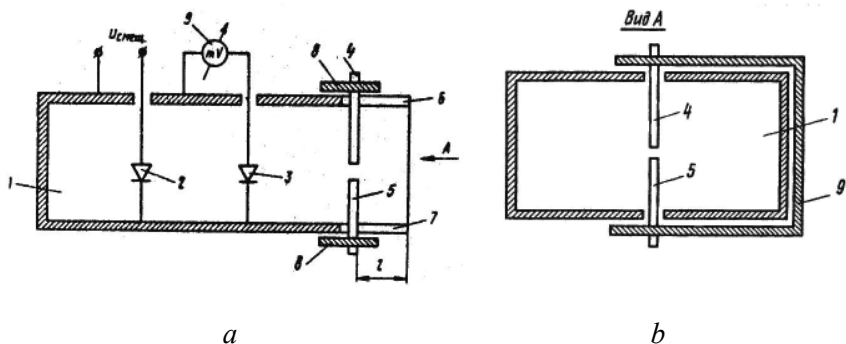


Рис. 1.27

Список литературы к главе 1

1. Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. 55 с.

2. Арапов Ю.Г., Давыдов А.Б. Волноводные методы измерения электрических параметров полупроводников на СВЧ // Дефектоскопия. 1978. № 11. С. 63–87.

3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Использование СВЧ-фотонных структур для измерения параметров нанометровых пленок // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 9. С. 80–88.

4. Anlage S.M., Steinhauer D.E., Feenstra B.J., Vlahacos C.P., Wellstood F.C. Near-field microwave microscopy of materials properties // Microwave Superconductivity. Amsterdam: Kluwer, 2001. P. 239–269.

5. Ash E.A., Nicholls G. Super-resolution Aperture Scanning Microscope // Nature. 1972. V. 237, № 5357. P. 510–512.

6. Nozokido T., Bae J., Mizuno K. Scanning near-field millimeter-wave microscopy using a metal slit as a scanning probe // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2001. V. 49, № 3. P. 491–499.

7. Golosovsky M., Galkin A., Davidov D. High-spatial resolution resistivity mapping of large-area YBCO films by a near-field millimeter-wave microscope // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1996. V. 44, № 7. P. 1390–1392.

8. *Nozokido T., Nuimura S., Hamano T., Bae J., Mizuno K.* A new object mounting structure for use in millimeter-wave scanning near-field microscopy // *IEICE Electronics Express*. 2004. V. 1, № 6. P. 144–149.
9. *Golosovsky M., Davidov D.* Novel millimeter-wave near-field resistivity microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68, № 11. P. 1579–1581.
10. *Abu-Tuir M., Golosovsky M., Davidov D., Frenkel A., Goldberger H.* Near-field scanning microwave probe based on a dielectric resonator // *Review of Scientific Instruments*. 2001. V. 72, № 4. P. 2073–2079.
11. *Nozokido T., Iibuchi R., Bae J., Mizuno K., Kudo H.* Millimeter-wave scanning near-field anisotropy microscopy // *Review of scientific Instruments*. 2005. V. 76, № 3. 033702 (6 pag).
12. *Theerawisitpong S., Suzuki T., Negishi T., Watanabe Y.* Near-field transmission imaging by 60 GHz band waveguide-type microscopic aperture probe // *IEICE Trans. on Commun.* 2007. V. E90-B, № 9. P. 2387–2393.
13. *Усанов Д.А., Горбатов С.С.* Волноводный измерительный резонатор // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2002. Т. 45, № 9. С. 26–28.
14. Устройство для измерения параметров материалов: А.с. 1493939 / *Усанов Д.А., Лицов А.А.*; Заявитель Саратовский ун-т.; Оpubл. 15.07.89. Бюл. № 26. Приоритет от 26.10.87.
15. *Лицов А.А., Усанов Д.А.* Резонансное затухание СВЧ-мощности в полубесконечном волноводе, содержащем индуктивный штырь с зазором // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1986. Т. 29, № 3. С. 53–58.
16. *Hong S., Kim J., Park W., Lee K.* Improved surface imaging with a near-field scanning microwave microscope using a tunable resonator // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 80, № 3. P. 524–526.

ГЛАВА 2. БЛИЖНЕПОЛЕВЫЕ СВЧ-МИКРОСКОПЫ С КООКСИАЛЬНЫМИ ЗОНДАМИ

Ближнеполевые СВЧ-микроскопы с коаксиальным зондом, у которого внутренний проводник выступает за пределы внешнего, относятся к наиболее часто используемым в практике. Информационным параметром, позволяющим определять характеристики исследуемого образца, часто является коэффициент отражения. Конец линии передачи может быть составной частью резонатора. В этом случае обеспечивается повышенная чувствительность и информативность метода. Например, авторы [1] использовали в своем микроскопе резонансный, разомкнутый на конце коаксиальный кабель, подключенный через разделительный конденсатор и ответвитель к СВЧ-генератору (рис. 2.1). В отсутствие исследуемого образца кабель представлял собой полуволновой резонатор. При приближении металлизированного образца к открытому концу коаксиала начинают реализовываться условия возникновения четвертьволнового резонанса. Длина созданного авторами [1] резонатора составляла 1 м, рабочая частота 125 МГц.

Исследуемый образец сканировался под зондом. Расстояние зонд — образец, зависящее от топологии образца, изменялось при сканировании в результате изменения емкостной связи с образцом. Это влекло за собой изменение резонансной частоты. Резонансная частота и добротность системы зависят также от свойств образца, которые могут быть определены по величине изменения этих характеристик резонатора. В предложенном авторами [1] микроскопе была реализована система сканирования зонда со скоростью 25 мм/с. Пространственное разрешение при измерениях с помощью предложенного авторами [1] микроскопа оказывалось большим, чем расстояние зонд — образец и диаметр внутреннего проводника коаксиала, используемого в качестве зонда. При этом заостренные зонды обеспечивали более высокое пространственное разрешение, чем тупые. Изображение коаксиального зонда с заостренным концом, расположенным над исследуемым образцом, показано на рис. 2.2.

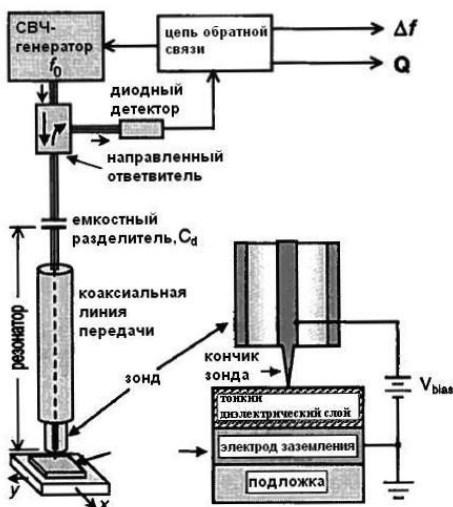


Рис. 2.1

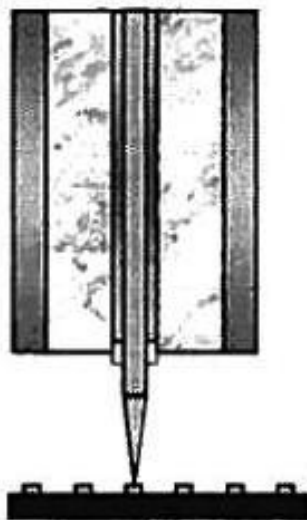


Рис. 2.2

Зонд с тупым концом обеспечивал пространственное разрешение, определяемое площадью центрального проводника при работе на расстояниях от образца меньших, чем его диаметр. Авторы [1] называли СВЧ-резонатор сердцем ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Резонатор связан с исследуемым образцом через емкость. При изменении расстояния зонд — образец эта емкость изменяется. Если расстояние между зондом и образцом намного меньше диаметра зонда, то эту емкость можно рассматривать как характерную для плоского конденсатора. При приближении образца к зонду емкость эта будет увеличиваться, а частота уменьшаться. Если образец входит в контакт с зондом, то может выполняться условие четвертьволнового резонанса. В отсутствие такого контакта коаксиальный зонд может представлять собой полуволновый резонатор. Таким образом, максимальный ожидаемый сдвиг частоты в этом случае соответствует изменению частоты при преобразовании четвертьволнового резонатора в полуволновый. Большое число близкорасположенных по частоте типов колебаний, каждый из которых может быть использован для измерений, открывает возможность использования прибора в

широкой полосе рабочих частот. Авторы [1] утверждали, что может быть достигнута полоса рабочих частот 100 ГГц. Такого рода микроскоп может быть успешно использован для измерений при комнатной температуре, при низких температурах (температурах жидкого азота), а также при повышенных температурах (до 1000° С). Авторы [1] отмечали возможность использования ближнеполевого СВЧ-микроскопа для исследования свойств полупроводников в условиях воздействия на них статических или низкочастотных электрических и магнитных полей. С помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа можно исследовать топографию поверхности образца (внешняя информация) и получить информацию о его диэлектрической проницаемости и проводимости (внутренняя информация). И в одном и в другом случаях информативными параметрами являются сдвиг частоты и изменение добротности резонатора. Для определения топографии образца авторы [1] использовали калибровочные кривые, связывающие сдвиг частоты с расстоянием до образца. Они сообщили о достижении разрешения по высоте неоднородностей на металлической поверхности в 55 нм при расстоянии между зондом и образцом в 30 мкм, в 40 мкм — при расстоянии 1,75 мм. Для измерения сопротивления слоя авторы [1] использовали зависимость добротности системы Q от сопротивления образца R_x , при этом использовалась ветвь кривой зависимости R_x от Q для известной толщины образца. Для частоты 7,5 ГГц при расстоянии между зондом и образцом 50 мкм для $R_x=100$ Ом/□ удалось получить чувствительность $\Delta R_x/R_x=6.4 \cdot 10^{-3}$. Диаметр зонда при этом составлял 500 мкм. Была показана возможность определения с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа диэлектрической проницаемости ϵ_L в интервале значений от 2,1 до 230. Использовался зонд с диаметром центрального проводника 480 мкм. Рабочая частота составляла 9,08 ГГц. Наибольший сдвиг частоты 26,2 МГц наблюдался при приведении зонда в контакт с образцом с $\epsilon_L=230$ МГц. Для проведения измерений использовался набор предварительно откалиброванных образцов толщиной 6 мм с известными значениями ϵ_L в диапазоне от 2.1 до 230. Сдвиг частоты для $\epsilon_L=2.1$ составлял 1,2 МГц. Для повышения локальности измерений использовался выступающий за пределы внешнего проводника зонд с радиусом кривизны 1 мкм с контролируемым усилием прижима к образцу. Пространственное разрешение

в этом случае составляло ~ 1 мкм. Для повышения пространственного разрешения ближнеполевого СВЧ-микроскопа авторы [2] предложили коаксиальный резонатор располагать совместно с зондом сканирующего туннельного микроскопа, который, в свою очередь, используется для контроля расстояния между СВЧ-диодом и исследуемым образцом на уровне 1 нм. Экспериментальные исследования проводились в диапазоне частот $7 \div 11$ ГГц. Наличие контролируемого зазора позволяет избежать погрешности, связанной с изменением радиуса кривизны зонда, происходящем при большом количестве контактов. Кончик внутреннего проводника коаксиала выполнялся заостренным и выходил за пределы его внешнего проводника. Контроль зазора СВЧ-зонд — образец осуществлялся по току туннельного микроскопа. С помощью туннельного микроскопа обеспечивалось постоянство зазора СВЧ-зонд — образец на уровне 1 нм и тем самым достигалась максимальная чувствительность ближнего СВЧ-поля к изменению свойств материала образца.

Авторы [2] убедительно показали возможность достигать с помощью такого микроскопа разрешения не хуже чем 2,5 нм. С помощью такого микроскопа открывается возможность измерения потерь и нелинейных свойств материалов в локализованных областях.

Кроме исследований локальных свойств материалов, в частности в интегральных схемах, ближнеполевая СВЧ-микроскопия может быть использована для исследования в масштабах размеров, намного меньших длины волны излучения, конфигурации электромагнитного поля, излучаемого работающим прибором [3]. В качестве СВЧ-зонда микроскопа авторы [3] использовали являющийся частью резонатора открытый конец коаксиала. СВЧ-излучение от зондируемого источника поступает на детектор. Продетектированный сигнал позволяет составить картину распределения поля. Используемый авторами [3] микроскоп позволял также при горизонтальном сканировании зонда диаметром 50 мкм различать изменения расстояния до образца на уровне до 55 нм при удалении от него до 50 мкм.

Использование ближнеполевой СВЧ-микроскопии в предложенном варианте позволяло определять компоненту СВЧ-поля, излучаемую элементом интегральной схемы, нормальную к поверхности зонда. Ориентируя соответствующим образом зонд, можно получать изображения различных компонент СВЧ-поля. Знание распределения поля в электродинамических системах открывает возможность со-

вершенствования их параметров, а также конструировать новые типы устройств. Для измерения СВЧ-поля авторы [3] использовали зонд, кончик которого имел диаметр 200 мкм. Расстояние между зондом и исследуемым объектом составляло 350 мкм. Достигнутая чувствительность составляла несколько мегагерц на 1 мВ продектированного сигнала. Авторы [4] достигли с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа с зондом, аналогичным описанному в [3], пространственного разрешения 200 мкм. Диаметр внутреннего проводника коаксиальной линии, используемой в качестве зонда, составлял 200 мкм, внешнего — 860 мкм. Обеспечивалась возможность поддержания постоянства промежутка между зондом и исследуемым объектом в интервале значений от 10 мкм до нескольких мм. В качестве объекта исследований использовалось излучение от системы, изображенной на рис. 2.3. Электромагнитное поле от исследуемой системы индицировало разность потенциалов между внутренним и внешним проводниками коаксиала. Заряд, индуцируемый на поверхности зонда, пропорционален интегралу от нормальной составляющей электрической компоненты электромагнитного поля. Так же, как и в [3], зонд являлся составной частью резонатора. Рабочая частота микроскопа составляла 8 ГГц. Обеспечивалась возможность двухкоординатных измерений. Для проведения измерений требовалось, чтобы напряженность индицируемого СВЧ-поля была не менее 0,5 в/мм. Микроскоп был работоспособен в диапазоне частот от 80 МГц до 50 ГГц. На рис. 2.3 представлены полученные с помощью этого микроскопа изображения двух электрических компонент электромагнитного поля над медной микрополосковой линией с шириной полосок 2 мм на частоте 8,05 ГГц. Пунктирные линии показывают границы полоски. Рис. 2.3, *a* соответствует измерениям с вертикально расположенным зондом, рис. 2.3 *b* — горизонтально ($h = 455$ мкм).

Авторами [5] предложено в качестве зондирующей части ближнеполевого СВЧ-микроскопа использовать связанные объемный и коаксиальный резонаторы. В объемном резонаторе, состоящем из двух частей в виде чашек, возбуждаются колебания E_{011} -типа. Через центр основания съемной чашки выходит игла, которая образует с остальной частью отрезок коаксиала, связанный с объемным резонатором. Радиус острия иглы составлял 1–1,5 мкм, а сама игла выходила за пределы внешнего проводника. Рабочая частота микроскопа — 35,79 ГГц, добротность зонда составляла 2750.

Оригинальная конструкция зонда была предложена авторами [6]. Они использовали зонд с постепенно уменьшающимся диаметром — заостренный зонд, который соединялся с центральным проводником коаксиального резонатора, выступая за его пределы (рис. 2.4).

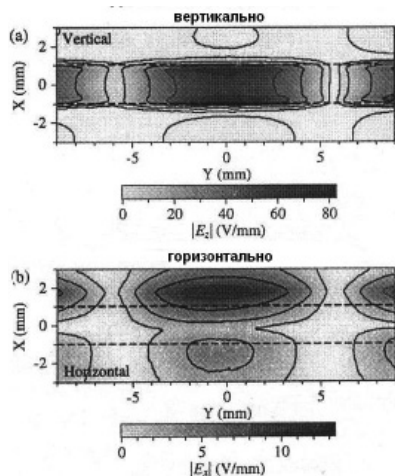


Рис. 2.3

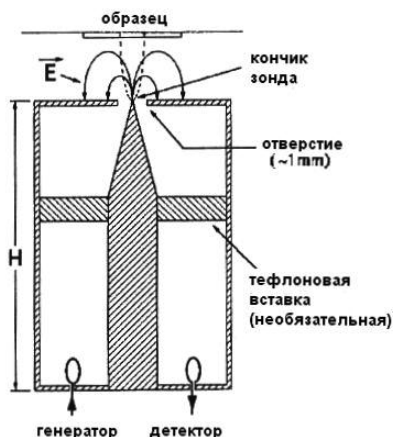


Рис. 2.4

Изменения в окрестности зонда приводят к изменению резонансной частоты резонатора. Зонд изготавливался из медной проволоки. Заострение до 10 мкм обеспечивалось методом вытягивания. С помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа с таким зондом авторам [6] удалось обеспечить пространственное разрешение проволок из Nb на уровне 5 мкм ($\lambda/100000$). Шаг сканирования составлял 1-2 мкм. Добротность резонатора в микроскопе была равной ~ 1000 , резонансная частота могла быть изменена в пределах 500 МГц. Кратковременная нестабильность частоты составляла ~ 100 Гц. При зондировании медной пленки толщиной 1000Å с размерами $200\text{ мкм} \times 200\text{ мкм}$ изменение резонансной частоты составляло 10 МГц.

Использовать коаксиальный зонд, включенный в цепь СВЧ-генератора с центральным проводником 3, выступающим за пределы внешнего проводника 2 на расстояние не более $0,3$ длины волны основного типа λ , для измерения диэлектрической проницаемости материалов авторы [7] предложили еще в 1982 году. В предложенном

ими устройстве, схема которого приведена на рис. 2.5, выступающую часть проводника они предлагали помещать в диэлектрический цилиндр 9. В этом случае длину выступающей части было необходимо уменьшить в $\sqrt{\varepsilon}$ раз, где ε — диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлен цилиндр. Отмечалось, что выполнение центрального проводника выступающим за пределы внешнего проводника приводит к увеличению концентрации поля на его конце по сравнению со случаем, когда его длина равна длине внешнего проводника и, следовательно, к увеличению степени взаимодействия с исследуемым образцом и в конечном итоге к повышению чувствительности. Такого типа зонд был также составной частью выпускавшихся в виде малых серий измерителей толщины металлических слоев на диэлектрическом основании в интервале значений от 5 нм до 5 мкм и диэлектрических слоев, нанесенных на металлическое основание [8–10]. На рис. 2.5 1, 4, 5-1, 5-2, 7, 8 — элементы схемы транзисторного генератора, работающего в режиме автодинного детектирования, 6 — измеритель протектированного сигнала.

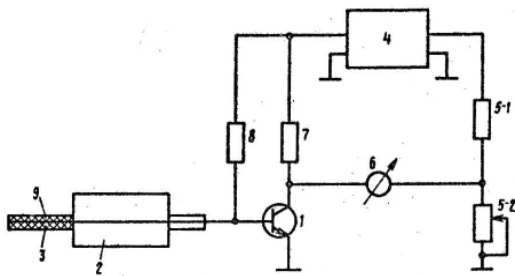


Рис. 2.5

Авторы [11] рассмотрели случай, когда кончик ближнеполевого СВЧ-микроскопа, состоящего из коаксиальной линии, соединенной с резонатором, через емкость подключенным к источнику СВЧ-излучения и цепи обратной связи, находится на расстоянии от образца меньшем 10 нм. Зонд в конце резонатора имел заостренный металлический кончик, такой же как в туннельном микроскопе. Эквивалентную схему для описания взаимодействия зонд — образец предложено представлять в виде последовательно соединенной емкости C_x и ре-

зистора R_s , учитывающего проводимость образца. Таким образом, выражение для импеданса этой системы будет иметь вид

$$Z_x = R_x + \frac{1}{i\omega C_x}.$$

В пределе малых значений C_x , $\omega C_x R_x \ll 1$ и частотный сдвиг Δf микроскопа оказывается независимым от R_x и связанным только с C_x , а именно:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{C_x}{2C_0},$$

где f_0 — частота резонатора при $C_x \rightarrow 0$, а C_0 — суммарная емкость микроскопа. В этом случае об R_x можно судить по значению добротности Q . Были проведены измерения образца кремния, легированного бором. При измерениях использовали зонд с кончиком из посеребрянного вольфрама. Рабочая частота микроскопа составляла $2,747 \cdot 10^9$ Гц, $C_x = 10^{-14}$ Ф.

На рис. 2.6 показаны типичные значения сдвига частоты в зависимости от расстояния между зондом и металлическим образцом в интервале $1 \div 100$ нм.

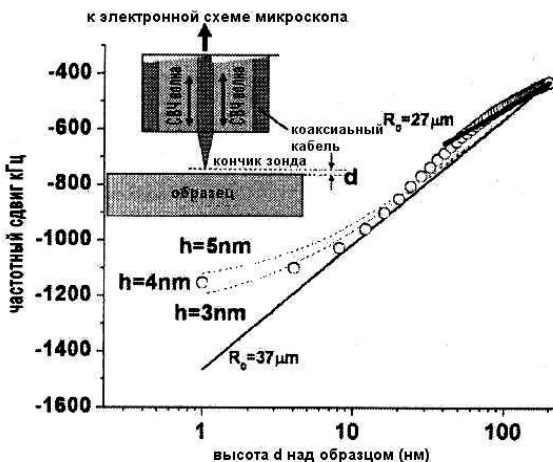


Рис. 2.6

Из результатов, приведенных на этом рисунке, видно, что в области значений высоты, меньших 10 нм, наблюдается отклонение от логарифмической зависимости, которая при больших значениях высоты представляет собой прямую линию. Такой же характер зависимости наблюдается и для металлических слоев. Измеренная зависимость туннельного тока в вакууме для Pt/Ir — кончика зонда над образцом из золота на аноде носит экспоненциальный характер в интервале значений $144 \div 156$ А, как это и предсказывает теория (рис. 2.7).

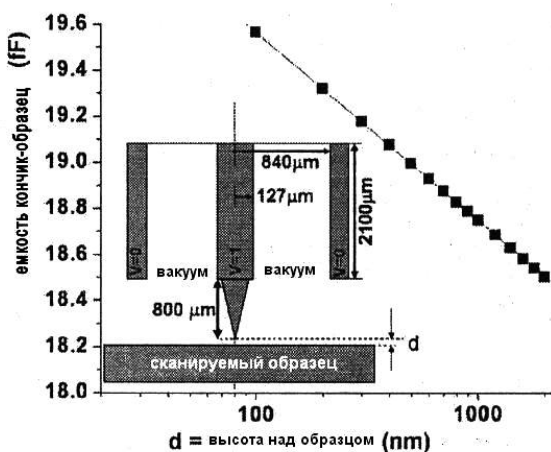


Рис. 2.7

Такой характер зависимости следует из выражения для туннельного тока $I \sim e^{-2ka}$, где $k = \sqrt{2m(V_B - E)}/\hbar$, E — энергия состояния, V_B — потенциал барьера. Для объяснения этих зависимостей авторами [11] была предложена модель кончика зонда, учитывающая его особенности, значимые при расстояниях до плоскости образца, меньших 10 нм. Для расчета емкости между выступающим за пределы внешнего проводника коаксиала заостренным внутренним проводником и образцом использовалась какая-либо из возможных модификаций формы кончика зонда. В качестве такой модификации авторы [12] предложили использовать сферу радиусом R_0 . При этом образец представлялся бесконечной плоскостью. Использование для такой модели ме-

тогда зеркального отображения заряда позволяет получить аналитические выражения для емкости и электрического поля. Авторы [11] использовали также численный метод расчета для случая, когда конец зонда отличается от сферической формы. Физическая интерпретация зависимости емкости зонд — образец при расстояниях между ними d , меньших 10 нм, состоит в том, что при приближении зонда к образцу изменяется эффективная площадь конденсатора. На рис. 2.8 приведены изображения кончиков зонда, используемых в туннельном и ближнеполевом сканирующем микроскопах.

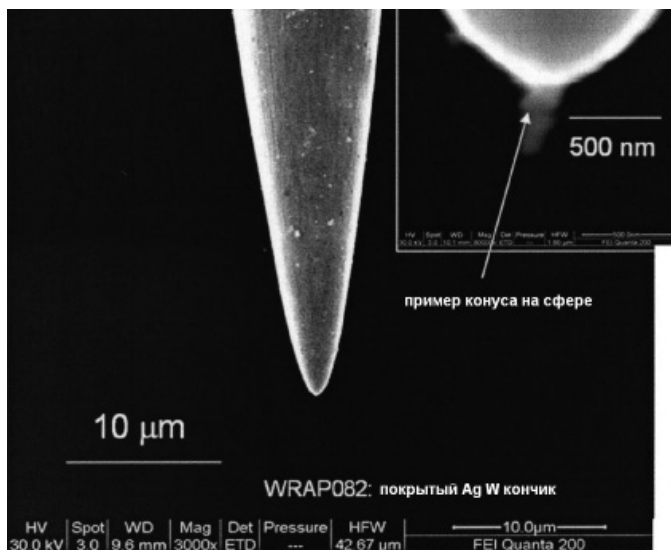


Рис. 2.8

Видно, что имеющий коническую форму зонд в самом конце закругляется и представляет собой встроенную в него сферу радиуса r . На сфере имеется характерный выступ, увеличенное изображение которого показано на том же рисунке. Размер этого выступа составляет несколько нм. Рис. 2.9 иллюстрирует модель конца зонда со встроенной в него сферой радиуса R_0 .

На этом же рисунке приведены зависимости величины емкости между сферой плюс высота конуса до образца для различных значений высоты конуса.

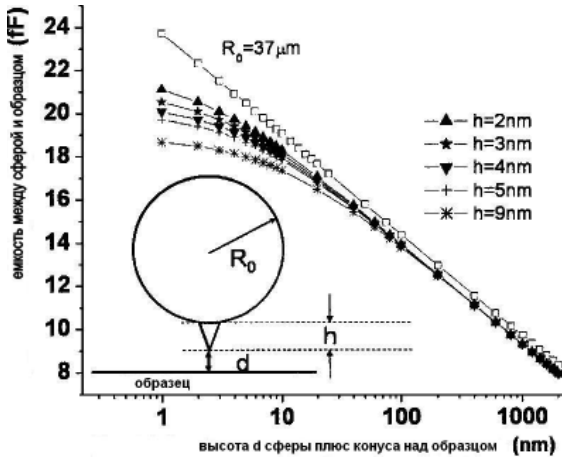


Рис. 2.9

На взаимосвязь формы зонда и чувствительность ближнеполевого СВЧ-микроскопа указывали также авторы патента [12]. Они отмечали, что чувствительность микроскопа растет при уменьшении расстояния между зондом и исследуемым образцом. Соответственно, когда кончик зонда тонкий, разрешающая способность микроскопа велика, но его чувствительность при этом мала, то есть определена задача подбора зонда, имеющего высокую разрешающую способность и одновременно высокую чувствительность.

Рис. 2.10 иллюстрирует чувствительность и разрешающую способность ближнеполевого сканирующего микроскопа для формы зонда, приведенной на рис. 2.11, когда полоска из хрома шириной 27 мкм просканирована таким зондом.

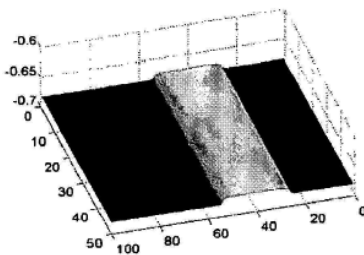


Рис. 2.10

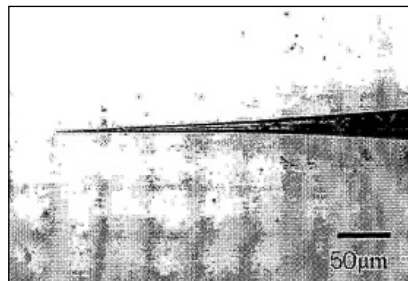


Рис. 2.11

Рис. 2.12 иллюстрирует форму зонда с утолщенным концом, а рис. 2.13 — результат сканирования той же полоски, что и в предыдущем случае.

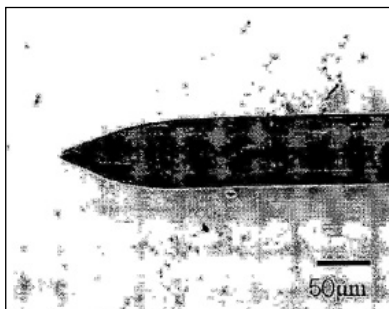


Рис. 2.12

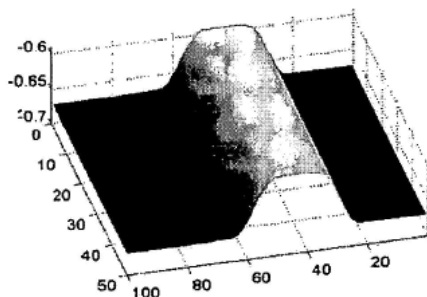


Рис. 2.13

Авторы [12] отмечали возможность изготовления зонда из металла, диэлектрика и магнитного материала. Они предложили гибридный тип зонда, который был изготовлен так (рис. 2.14), что он имел на конце радиус от 1 до 10 мкм, как у заостренного зонда и близкую к нему предшествующую острию часть толщиной ~ 1 мм, как у тупого зонда. В этом случае разрешающая способность и чувствительность оказывались компромиссно высокими.

Проблема влияния геометрии кончика зонда на качество контраста изображения и уровень пространственного разрешения ближнеполевого СВЧ-микроскопа обсуждалась авторами [13]. Авторы этой работы отметили, что зонды у многих ближнеполевых СВЧ-микроскопов имеют коническую форму, а их кончики представляют собой сферу с радиусом от 0.1 до 12.6 мкм. При этом с помощью зондов большого радиуса обеспечивается лучший контраст изображения. Так, при использовании зонда с радиусом 8 мкм обеспечивается контраст сигнала в 1000 кГц, по сравнению с 85 кГц для радиуса 0,55 мкм. В то же время использование зонда с большим радиусом приводит к

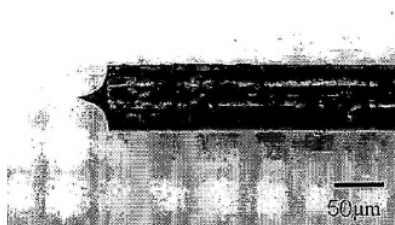


Рис. 2.14

искажению топографии, получаемой с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Авторы [13] сообщили о возможности получить изображение двухнанометрового углубления в пленке Pt/углерод в 7 нм, нанесенной на подложку Si/SiO₂, с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа, совмещенного с туннельным микроскопом. Они сообщили также о возможности фиксировать таким образом одноатомную ступеньку на поверхности меди. Авторы [13] привели микрофотографии различных кончиков обычно используемых зондов рис. 2.15 (первая колонка рисунка). Вторая колонка рис. 2.15 — те же фотографии, но при большем увеличении. В третьей колонке представлены те же изображения, но полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

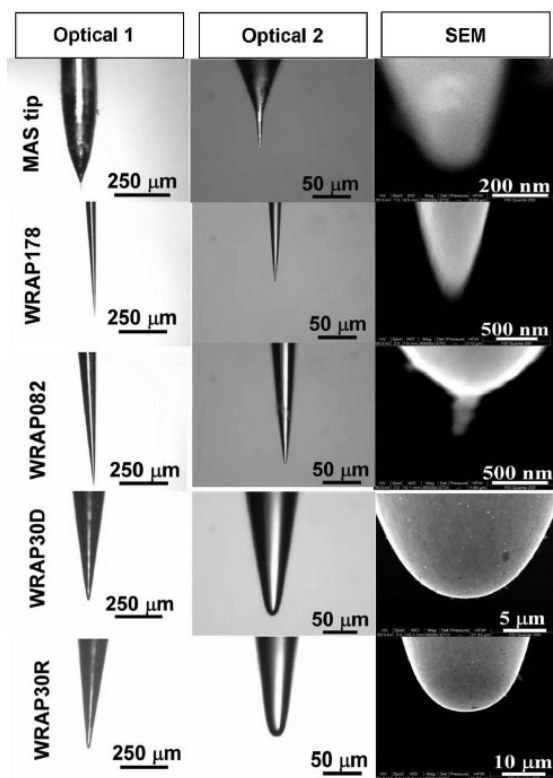


Рис. 2.15

Авторы [13] обнаружили, что наблюдаемый при измерениях сдвиг частоты резонатора экспоненциально увеличивается с увеличением радиуса сферы кончика зонда. Выполненные авторами [13] эксперименты позволили установить, что пространственное разрешение созданного ими ближнеполевого СВЧ-микроскопа не уступает аналогичной характеристике туннельного микроскопа. На рис. 2.16 приведены изображения тонких пленок $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ на подложках LaAlO_3 , полученные по измерениям добротности и сдвигу частоты.

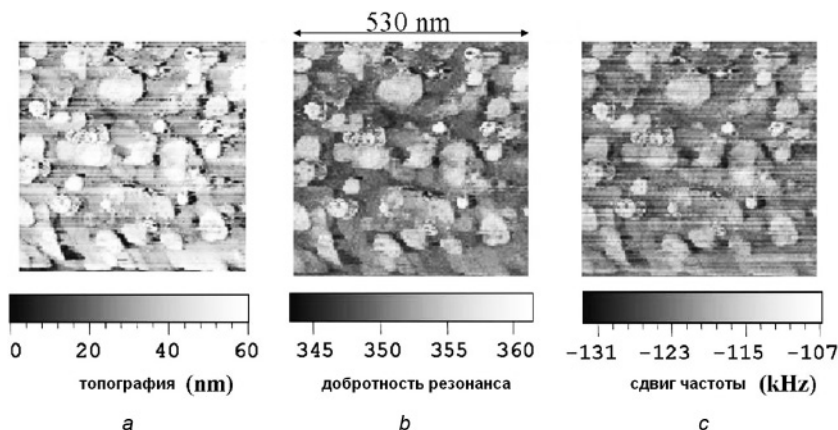


Рис. 2.16

На этом же рисунке приведено аналогичное изображение топографии поверхности, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Сопоставление изображений свидетельствует об их идентичности.

Авторы [14] предложили использовать для расчета распределения поля у кончика зонда сканирующего ближнеполевого СВЧ-микроскопа в объеме тонких диэлектрических образцов метод зеркального отображения заряда. Ими было показано, что результаты расчета этим методом существенно отличаются от известных расчетов методом конечных элементов в области толщин, составляющих тысячные доли от радиуса зонда (рис. 2.17).

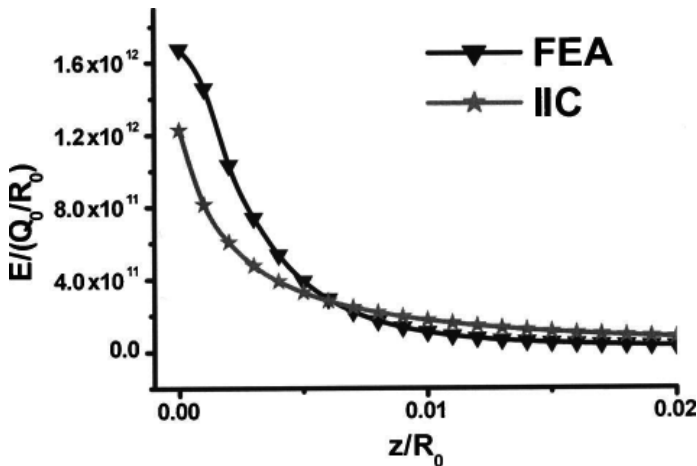


Рис. 2.17

Авторы [14] отмечали, что физику взаимодействия зонда ближне-полевого СВЧ-микроскопа с материалом исследуемого образца нельзя считать полностью изученной. Так, в частности, они отмечали, что при исследовании материалов с высокой проводимостью может стать значительным фактором учет потерь в зонде. В своих исследованиях авторы [15] использовали ближне-полевым СВЧ-микроскоп с зондовой частью, включающий четвертьволновой СВЧ-резонатор с выступающим за пределы проводника коаксиала с внутренним проводником, заостренным на конце. Добротность ненагруженного резонатора составляла $Q_0 = 652$. Рабочая частота выбиралась равной 2,66 ГГц. При теоретическом описании предполагалось, что образец связан с зондом через емкость. Упрощенная схема экспериментальной установки показана на рис. 2.18.

Емкость «зонд — образец» обозначена на рисунке как C_c , влиянием емкости между внешним проводником коаксиала и образцом можно пренебречь. При проведении экспериментов измерялись относительные сдвиги частоты $\Delta f/f_0$ и относительное изменение добротности Q/Q_0 при изменении высоты расположения зонда над образцом в интервале высот от 0,1 до 1000 мкм.

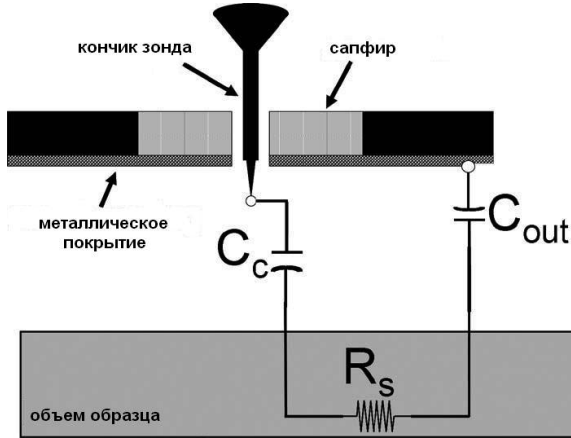


Рис. 2.18

Результаты таких измерений для образцов из кремния и плавяного кварца приведены на рис. 2.19 и для меди на рис. 2.20.

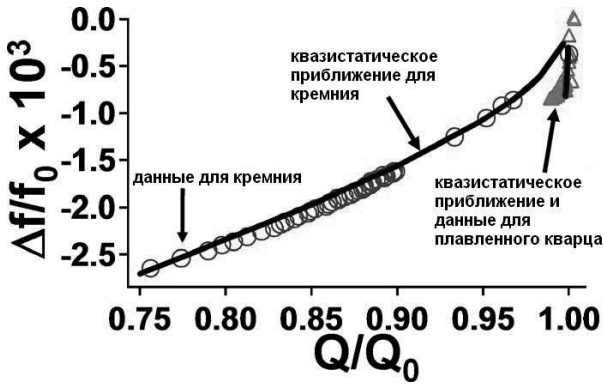


Рис. 2.19

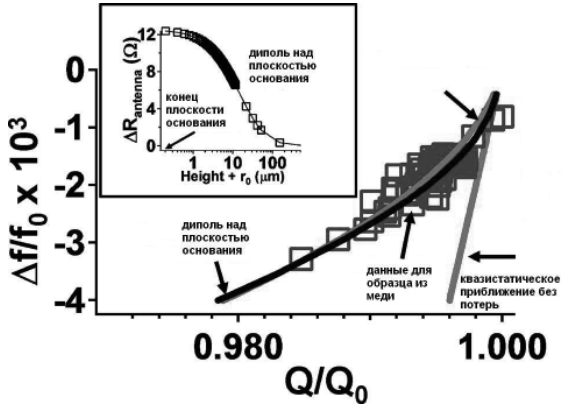


Рис. 2.20

На рис. 2.19–2.20 приведены результаты расчета этих зависимостей при использовании квазистатического приближения. Из сопоставления результатов расчетов и экспериментов следует, что для кремния и кварца наблюдается хорошее соответствие теории и эксперимента. Для меди достижение такого соответствия оказывается возможным, если в эквивалентную схему ввести элемент, учитывающий дополнительные потери в системе. Желая отразить обобщенную зависимость изменения измеряемых параметров зондовой системы от высоты разложения зонда над образцом, авторы [15] привели зависимость произведения $\Delta f/f_0$ на Q/Q_0 от h и отдельно Q/Q_0 от h (рис.2.21).

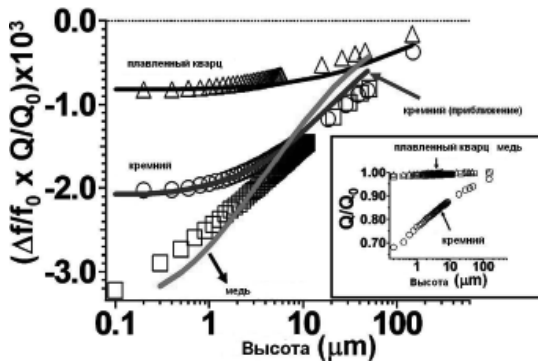


Рис. 2.21

В результате оказалось, что зависимости Q/Q_0 от h для меди и кварца неразличимы, тогда как $\Delta f/f_0 \times Q/Q_0$ для меди, кварца и кремния существенно различны.

Авторы [16] предложили использовать коаксиальную конструкцию кончика зонда, совместимую с зондами коммерческих атомно-силовых микроскопов. Коаксиальный зонд состоит из двух главных секций (рис. 2.22, а): волноводной (секция 1) и перекладки кантилевера (секция 2), соединенной с кончиком зонда.

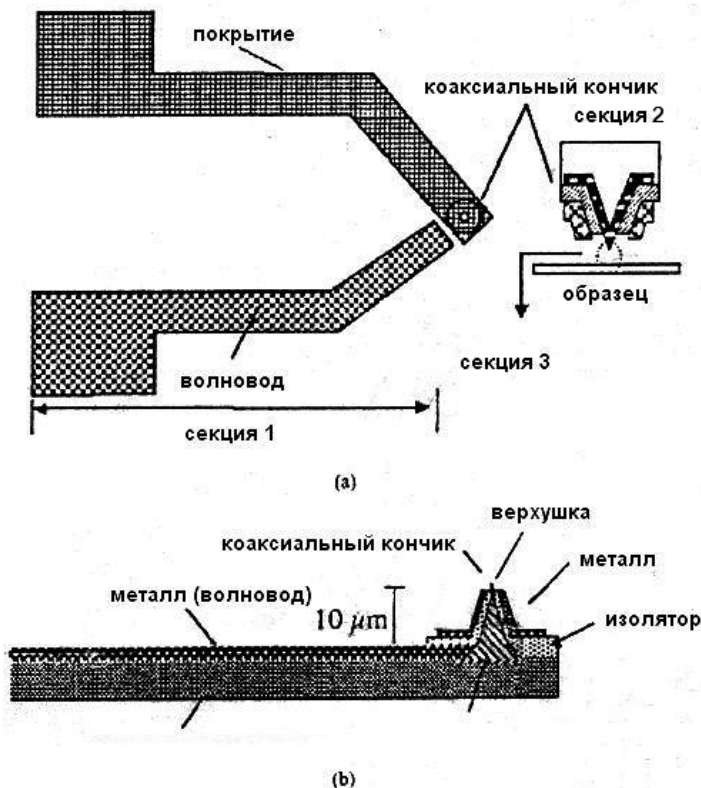


Рис. 2.22

Радиус вертушки кончика ~ 10 нм. Кончик имеет коническую вертушку, окруженную слоем диэлектрика и коаксиальной защитой. Отверстие вблизи вертушки кончика должно быть достаточно узким, чтобы ограничивать ближнее поле в окрестности окружающего кончик пространства. В созданном авторами [16] зонде радиус этого отверстия составлял ~ 500 нм. Поперечное сечение секции зонда (3) показано на рис. 2.22, *b*. Заострение кремниевых кончиков зонда осуществлялось в результате термического окисления при температуре 950°C . Легирование кремниевого кончика осуществлялось ионами бора. В качестве волновода использовалась алюминиевая копланарная линия. С помощью разработанного микроскопа авторы [16] получили изображения нанометровых образцов со структурной решеткой Si_3N_4 с бороздами на поверхности. Ими было получено пространственное разрешение с помощью ближнеполевого микроскопа ~ 50 нм на частоте 2.8 ГГц, тогда как аналогичное разрешение с помощью атомно-силового микроскопа составляло величину 100 нм. Авторы [17] подробно описали конструкцию зонда и его оконечной части для микроскопа, который они назвали М-АФМ (Microwave-Atomic Force Microscope — СВЧ-атомно-силовой микроскоп). При создании микроскопа его разработчики ставили цель — обеспечить возможность измерения электрических свойств материалов (диэлектрической проницаемости, проводимости и других) наряду с измерением топографии материалов в нанометровом масштабе размеров. Такое сочетание позволяет с нанометровой точностью поддерживать расстояние между измеряемым образцом и кончиком зонда. Кончик зонда, изготовленный из GaAs, имел длину 8 мкм и радиус кривизны острия ~ 50 нм. Кантилевер микроскопа имел размеры $254 \times 31,6 \times 11,1$ мкм в среднем. СВЧ-сигнал измерялся с помощью анализатора, использовалась коаксиальная линия с внутренним диаметром 1 мм. Сигнал от коаксиального кабеля к кончику зонда подводился через волновод в виде золотых пластин шириной 100 нм и толщиной 50 нм, нанесенных как это показано на рис. 2.23; 2.24; 2.25.

Внешний и внутренний проводники коаксиальной линии, соединяясь с соответствующими золотыми пластинами, трансформировались в плоскопараллельный волновод. В порядке определения пространственного разрешения созданного М-АФМ зонда был измерен

образец с решеткой, характеризующейся 2000 линий на мм. Площадь сканирования составляла 2x2 мкм при скорости сканирования 3 мкм/с.

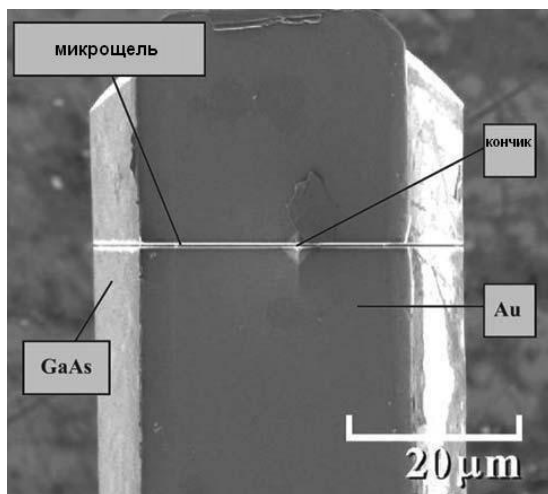


Рис. 2.23

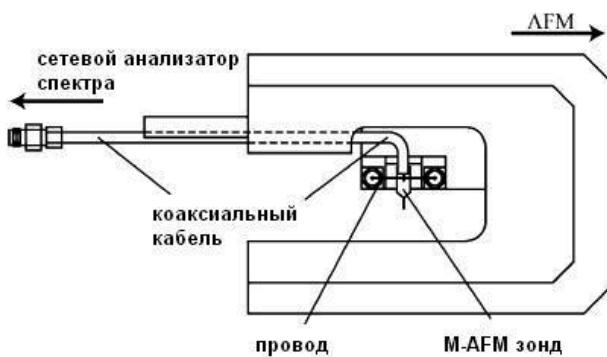


Рис. 2.24

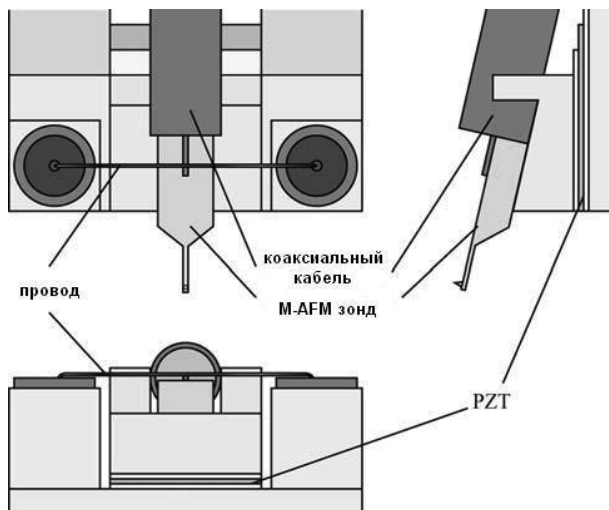


Рис. 2.25

На рис.2.25 показано изображение решетки, полученное с помощью М-АФМ. На рис. 2.26, *a* показано 2-Д изображение и на рис. 2.26, *b* — 3Д изображение. Белые пятна на этих рисунках означают микропылинки. Эти изображения свидетельствуют о возможности получать с помощью М-АФМ информацию в нанометровом масштабе.

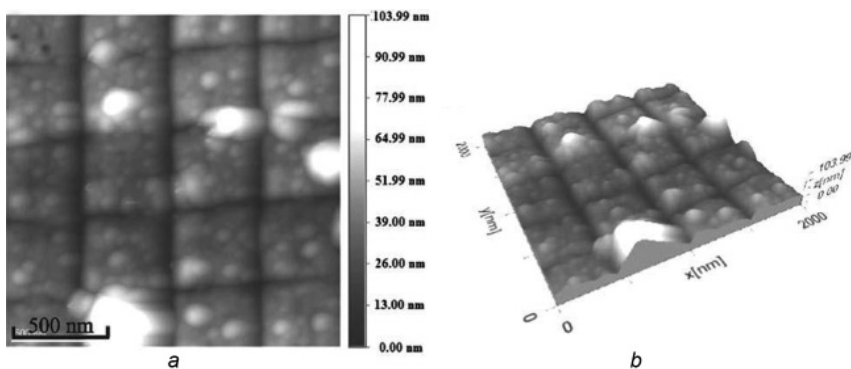


Рис. 2.26

Авторы [18] предложили усовершенствовать зондовую часть ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа. Они дополнили коаксиальный зонд с выступающим внутренним проводником аналогичным элементом, образующим промежуток для расположения в нем исследуемого образца. Целью такого усовершенствования было повышение локальности и чувствительности измерений. Предложенный зонд они назвали квадраксиальным. Конструкция этого зонда схематически показана на рис. 2.27, *a*.

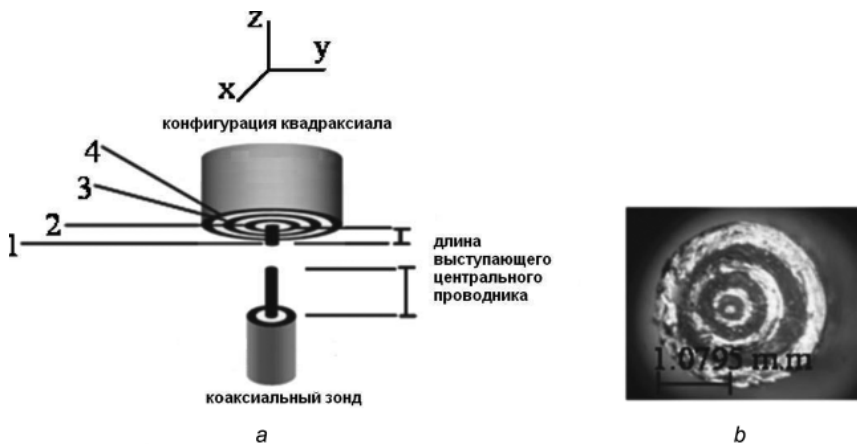


Рис. 2.27

На рис. 2.27, *b* приведена фотография дополнительной части зондовой системы. Дополнительная часть зонда, кроме центрального проводника, включала в себя три чередующихся концентрических металлических слоя, разделенных диэлектрическими слоями. При этом для уменьшения уровня шума второй и четвертый металлические проводники заземлялись. Обычный (основной) коаксиальный зонд мог использоваться как детектор. Он изготавливался из коаксиального кабеля сопротивлением 50 Ом (внешний диаметр 508 мкм, внутренний — 112 мкм). Длина выступающего внутреннего проводника выбиралась из интервала 300÷500 мкм. В качестве диэлектрика использовался тефлон ($\epsilon = 2.1$). Толщина диэлектрического слоя между центральным проводником 1 и проводником 2 составляла 135 мкм, между 3 и 4 — 241 мкм. В результате измерений

поля в окрестности зонда было установлено, что в ближнеполевой зоне квадраксиального зонда СВЧ-поле уменьшается намного быстрее (примерно в 2 раза) в направлении, перпендикулярном поверхности центрального проводника, по сравнению с обычным коаксиальным зондом. Для демонстрации возможностей созданного зонда авторы [18] использовали металлическую (золотую) полоску шириной 100 мкм, расположенную на стеклянной подложке рис. 2.28, а.

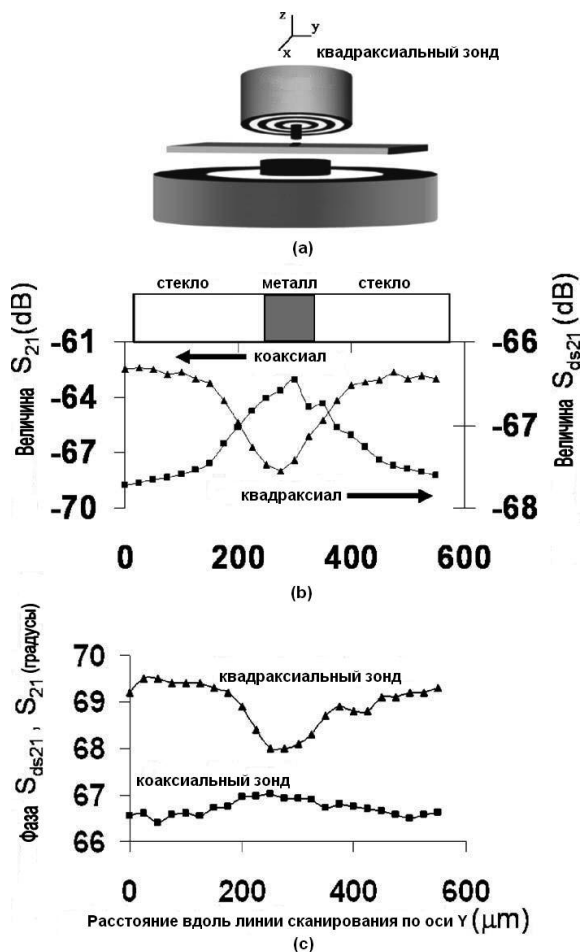


Рис. 2.28

Обеспечивалось перемещение этой полоски в горизонтальной плоскости относительно дополнительного зонда. На рис. 2.28, с приведены результаты сканирования полоски с использованием квадрансального зонда (верхняя кривая) в сравнении с такими же измерениями с использованием коаксиального зонда (нижняя кривая). Из приведенных авторами оценок следует, что пространственное разрешение при использовании предложенной конструкции зонда увеличивается примерно на 13,2 %. Измерения проводились на частоте 100 МГц.

Авторы [19] использовали ближнеполевой СВЧ-микроскоп для локальных измерений фотопроводимости в поверхностных слоях солнечных элементов. Такого рода измерения могут дать информацию, необходимую для повышения эффективности работы этих элементов. Расстояние между зондом и исследуемой поверхностью на уровне 20 нм контролировалось с помощью туннельного зондового сенсора. Зонд СВЧ-микроскопа диаметром 50 мкм изготавливался из нержавеющей стали. Конеч зонда заострялся. Незаостренный конец зонда служил элементом связи с диэлектрическим резонатором с частотой резонанса 4,1 ГГц. Структура исследуемой ячейки солнечного элемента показана на рис. 2.29.

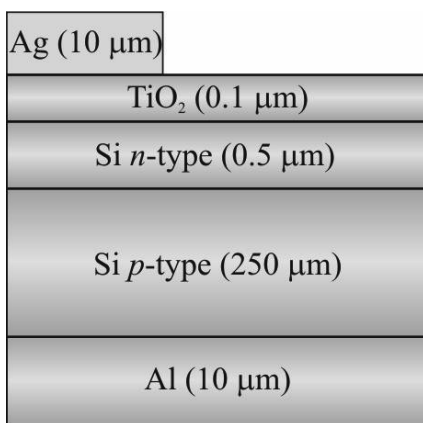


Рис. 2.29

Она включала в себя слой алюминия толщиной 10 мкм, слой кремния p -типа толщиной 250 мкм, слой кремния n -типа толщиной 0,5 мкм, антиотражающий слой из диоксида титана толщиной 0,1 мкм и опоясывающий сверху десятимикронный слой серебра. Однородность излучения обеспечивалась четырьмя светоизлучающими диодами, расположенными на расстоянии 2 см над поверхностью ячейки. Информационным параметром являлся коэффициент отражения S_{11} .

На рис. 2.30 приведены полученные с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа частотные зависимости S_{11} для различных значений интенсивности облучения светом солнечного элемента.

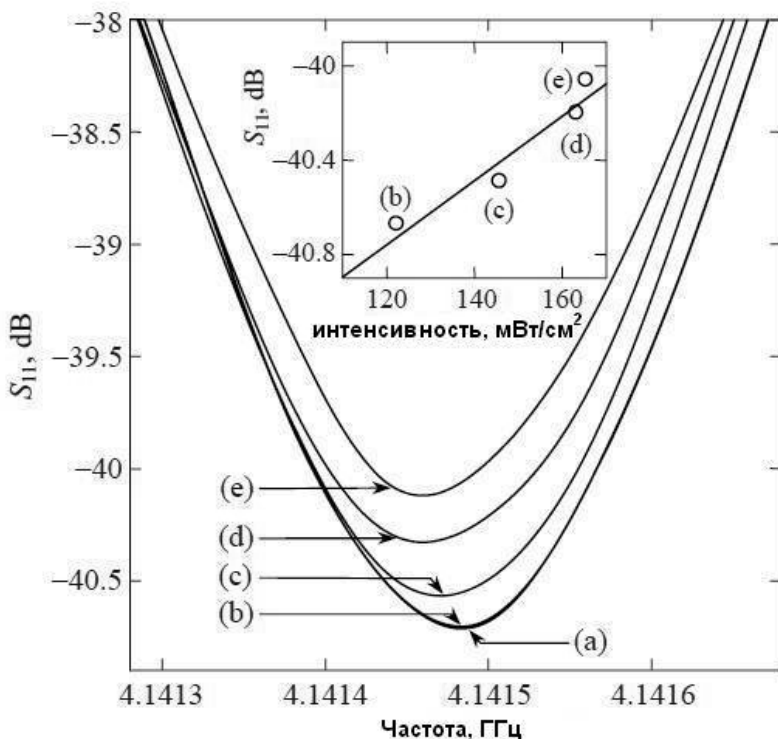


Рис. 2.30

Кривая a на этом рисунке соответствует темновому режиму, b — интенсивности облучения 122 мВт/см^2 , c — 146 мВт/см^2 , d — 163 мВт/см^2 . Из приведенных на этом рисунке результатов следует, что при интенсивности до 122 мВт/см^2 световое излучение не вызывает экспериментально различимого изменения электропроводности (кривые a и b практически совпадают). На вставке к этому рисунку показана зависимость S_{11} от интенсивности на резонансной частоте.

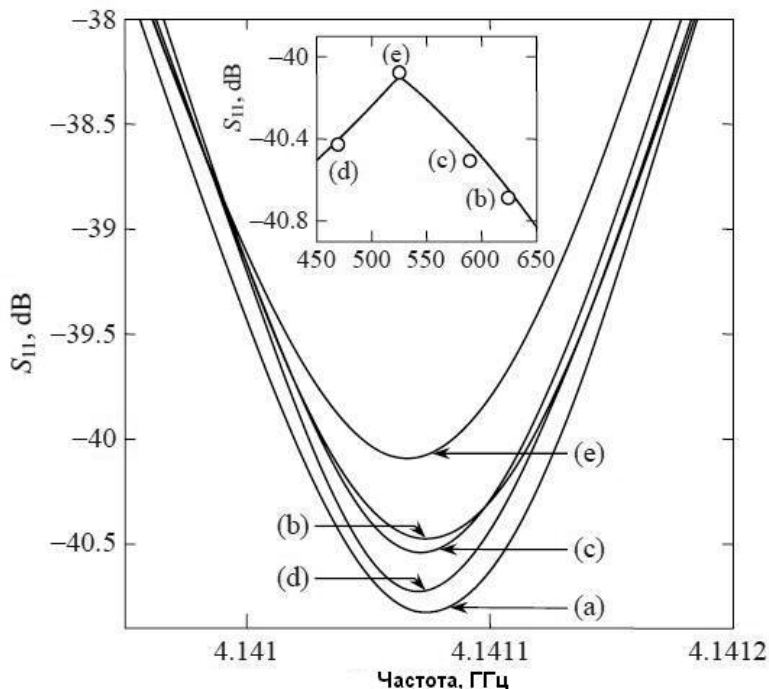


Рис. 2.31

На рис. 2.31 приведены частотные зависимости S_{11} для различных значений длины волны света фиксированной интенсивности (166 мВт/см^2). Кривая a соответствует темновому режиму, b — длине волны 625 нм , c — 590 нм , d — 460 нм , e — 526 нм . На вставке к этому рисунку приведена зависимость S_{11} от длины волны света на резонансной частоте.

Для расчета S_{11} использовалось соотношение

$$S_{11} = 20 \log \left| \frac{Z_R + Z_c + k_T Z_S^R - Z_0}{Z_R + Z_c + k_T Z_S^R + Z_0} \right|, \quad (1)$$

где Z_0 — импеданс резонатора,

Z_C — импеданс цепи соединений,

k_T — коэффициент, характеризующий связь зонда с полем резонатора,

Z_S^R — действительная часть комплексного импеданса солнечного элемента и Z_0 импеданс зонда равный 50 Ом.

Значение Z_S^R может быть представлено следующим образом:

$$Z_S^R = Z_a^2 k_a^2 t_n t_p (\sigma_n + \sigma_p), \quad (2)$$

где Z_a и k_a — импеданс и волновое число свободного пространства, $t_n, t_p, \delta_n, \delta_p$ — соответственно толщины и проводимости слоев n - и p -типа кремния. Полная проводимость представляется следующим образом:

$$\sigma_n + \sigma_p = \frac{\eta q_e I \tau (\mu_n + \mu_p)}{h\nu(t_n + t_p)}, \quad (3)$$

где η — коэффициент поглощения фотона, q_e — заряд электрона, τ — время жизни индуцированного светом заряда, μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок соответственно, I — интенсивность света и $h\nu$ — энергия фотона. Выражения (1) — (3) определяют связь между измеренным коэффициентом отражения S_{11} и электропроводностью, зависящей от длины волны и интенсивности освещения. Результаты расчета с использованием соотношений (1) — (3) хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными на рисунках кружками.

Изменение вырабатываемого солнечным элементом напряжения ΔV и изменение S_{11} , как следует из результатов измерений, подчиняется соотношению $\Delta S_{11} / \Delta V \approx 0,2 \text{ дБ/мВт см}^2$.

Соответствующие отношения ΔS_{11} к изменению интенсивности ΔI и длины волны $\Delta \lambda$ имеют вид

$$\Delta S_{11} / \Delta I \approx 0,014 \text{ дБ/мВт см}^2,$$

$$\Delta S_{11} / \Delta \lambda \approx 0,0063 \text{ дБ/нм}.$$

Авторы [20] использовали ближнеполевой сканирующий микроскоп с коаксиальным зондом, совмещённый с туннельным микроскопом с целью контроля расстояния между зондом и образцом, для измерения изменения сопротивления кремния, легированного бором. Образец представлял собой пластину с размерами 10×10 мкм с изменением сопротивления R_x от 30 до $5,5 \cdot 10^5 \Omega/\square$ на длине 10 мкм (рис. 2.32, а).

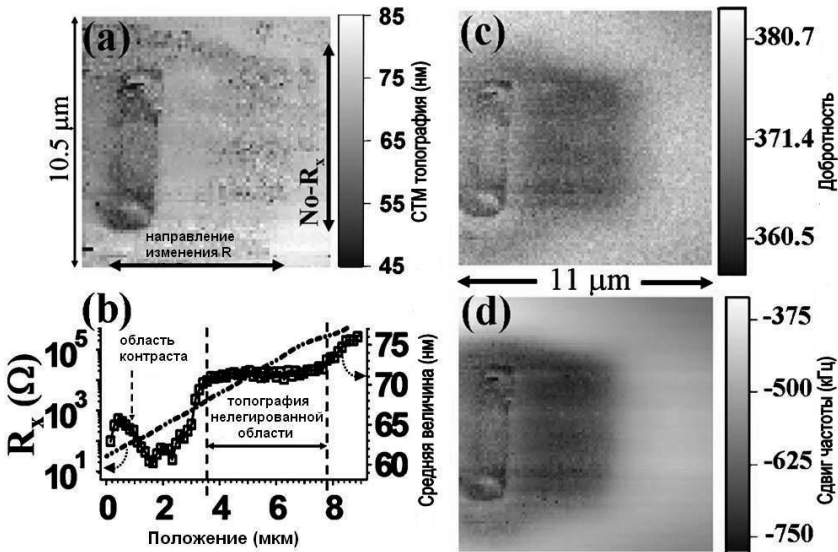


Рис. 2.32

Рельефное изображение образца, полученное с помощью туннельного микроскопа, показано на рис. 2.32, а. Рассчитанный профиль R_x как функции положения показан на рис. 2.32, б (пунктирная линия). Область концентрации бора находится на левой стороне образца. При постоянной высоте зонда над образцом в 1 нм были полу-

чены изображения добротности Q (рис. 2.32, *c*) и сдвига частоты Δf (рис. 2.32, *d*), где рабочая частота была равна 7,472 ГГц. Авторы [20] сообщили о возможности пространственного разрешения сопротивления образца не хуже, чем 100 нм.

Авторы [21] предложили коаксиальный зонд с выходящим за пределы внешнего проводника 7 коаксиала 4 его внутренним проводником 6, размещенном в сужающемся на конус к его кончику диэлектрическом цилиндре 8, соединять с отрезком полосковой линии. В этом отрезке размещен активный элемент 2 рис. 2.33.

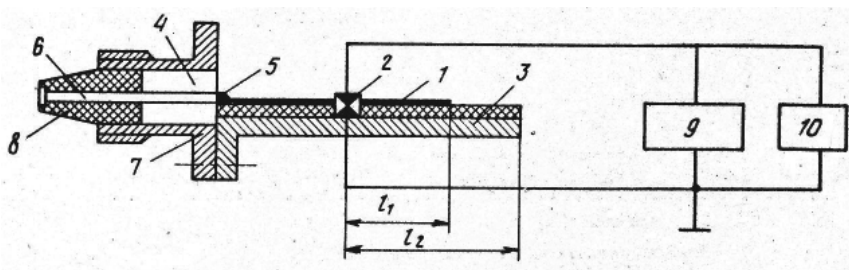


Рис. 2.33

При этом длина металлического основания 3 полосковой линии 1 от точки размещения активного элемента 2, подключенного к источнику питания 10, до ее свободного конца должна составлять не менее $0,4\lambda$. Длина полоски должна выбираться из интервала $0,2 - 0,35\lambda$, где λ — длина волны в полосковой линии. Такой отрезок полосковой линии выполняет функцию СВЧ-резонатора, а само устройство характеризуется расширенным диапазоном, в котором возможно проводить измерения контролируемой толщины металлодиэлектрических слоев. Толщина контролируемых образцов влияет на частоту резонанса микроскопа, что регистрируется измерителем 10.

Авторы [22] исследовали возможность визуализации с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа картины распределения затухающих волн и ее изменения при наличии в поле затухающих волн рассеивателей. В используемом авторами [20] микроскопе рабочая частота составляла 10,56 ГГц. Схематическое изображение устройства приведено на рис. 2.34.

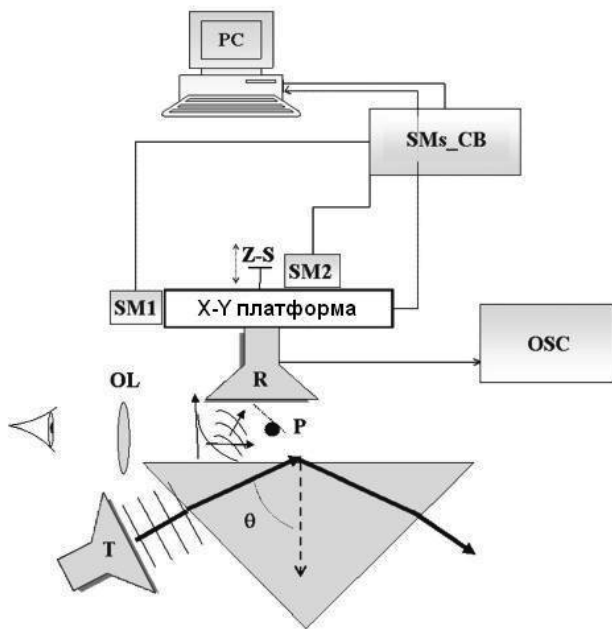


Рис. 2.34

Затухающие волны создаются вблизи поверхности прямоугольной призмы, для которой выполняются условия полного внутреннего отражения (показатель преломления материала призмы 1,43) падающего на нее СВЧ-излучения от генератора на диоде Ганна (длина волны излучения 2,85 см, мощность излучения 15 мВт). В качестве приемника использовался диод Шоттки, помещенный в резонатор, настроенный на частоту 10,525 ГГц. Приемник принимал компоненту поля, расположенную вдоль оси диода. Контроль распределения поля обеспечивался с помощью механического сканера с двумя шаговыми двигателями SM1 и SM2. Радиус кончика зонда СВЧ-микроскопа составлял 3мм. Обеспечивалось разрешение с помощью шаговых двигателей на уровне 0,125 см.

На рис. 2.35 приведены результаты расчетов и измерений, демонстрирующие изменение интенсивности затухающих волн в направлении, перпендикулярном поверхности призмы.

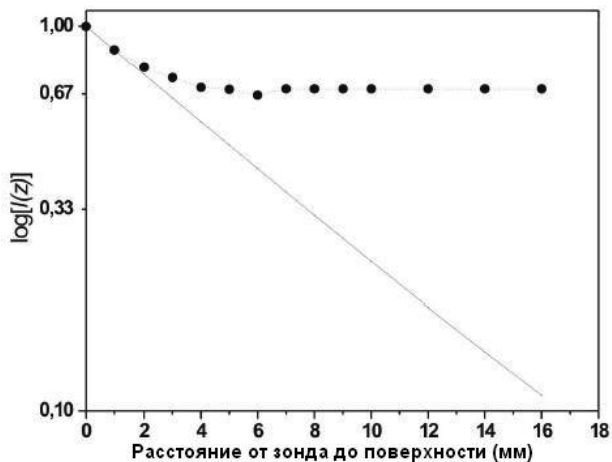


Рис. 2.35

Видно, что величина протектированного сигнала убывает на расстоянии от поверхности около 5 мм приблизительно в три раза.

На рис. 2.36 приведены результаты измерения картины интерференции затухающих волн для различных расстояний между кончиком зонда микроскопа и поверхностной линзы: *a* — зонд касается линзы, *b* — расстояние равно 2, *c* — 10 мм.

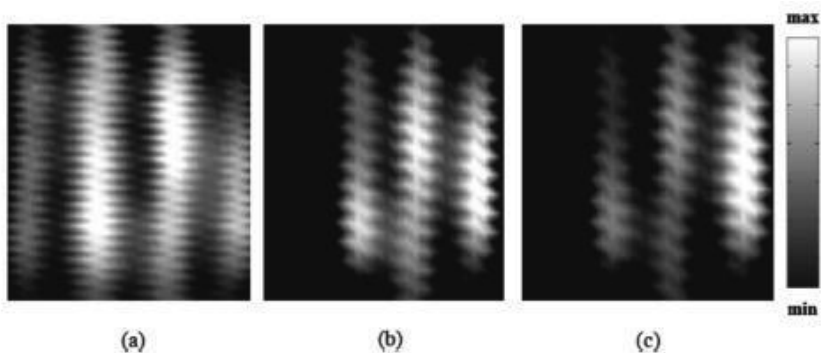


Рис. 2.36

Для наблюдения изменения картины распределения поля при наличии возмущающих воздействий на поверхности линзы располагались металлические шарики, которые вплавлялись в материал линзы. Картина распределения поля на рис. 2.37, *a* соответствует случаю отсутствия шарика, *c* — картина для шарика диаметром 1,5, *e* — 3 мм.

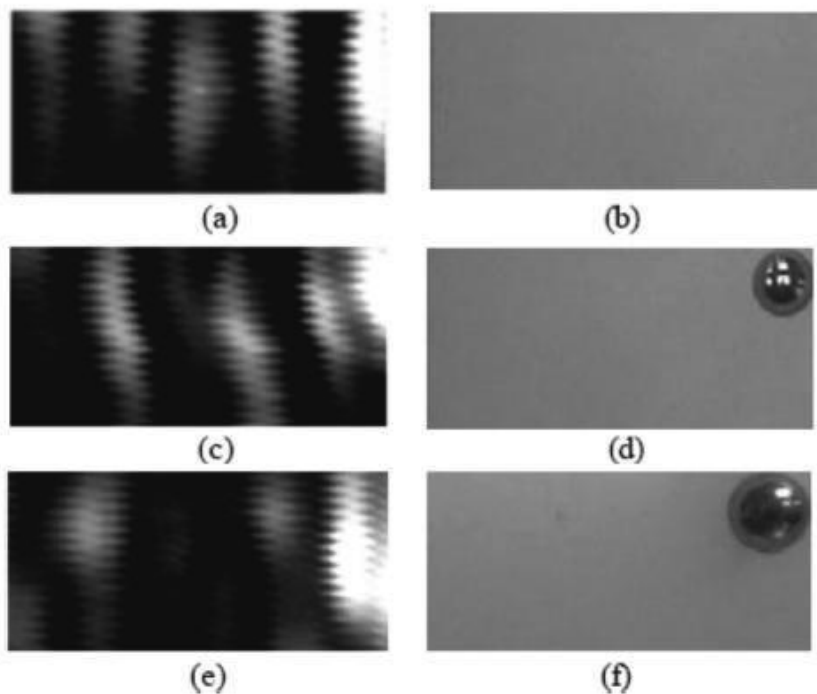


Рис. 2.37

На рис. 2.38 приведены распределения поля для случая, когда пять шариков выстроены в линию.

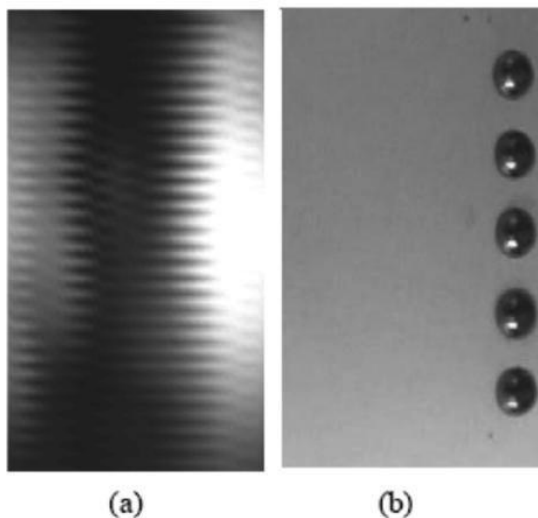


Рис. 2.38

На рис. 2.39 семь шариков расположены по параболическому закону. Из приведенного изображения поля для последнего случая следует, что наблюдается эффект фокусировки интерферирующих волн. Сигнал в области фокусировки увеличивается на несколько порядков. Авторы отмечают возможность использования эффекта фокусировки для повышения локальности сенсоров.

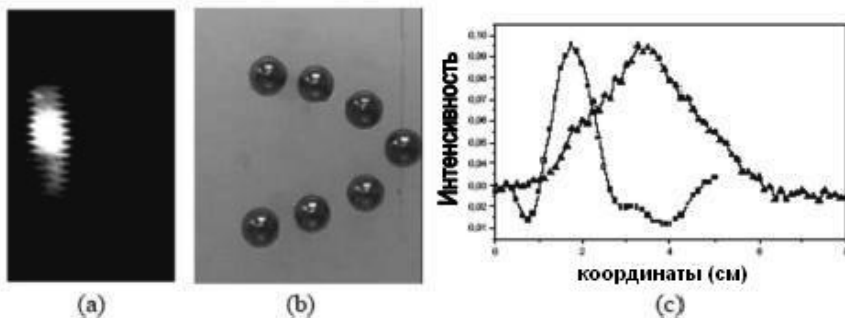


Рис. 2.39

Авторы [23] показали возможность проведения количественных измерений сопротивления пленок различных материалов с использованием зонда на затухающих волнах (ЕМР) в пределах от сопротивлений, характерных для металлов, до диэлектриков. Ими была показана также возможность измерения сопротивления полупроводниковых пленок. В экспериментах использовались металлические пленки, кремниевые эпитаксиальные пленки, пленки ИТО, окиси меди на различных подложках. Сопротивление измеряемых образцов изменялось в широком интервале значений. Образцы металлических пленок изготавливались из меди, сплава меди и алюминия, слоев TaN, образующих сложную структуру с легированным кремнием. Изменение емкости и сопротивления вызывает изменение добротности.

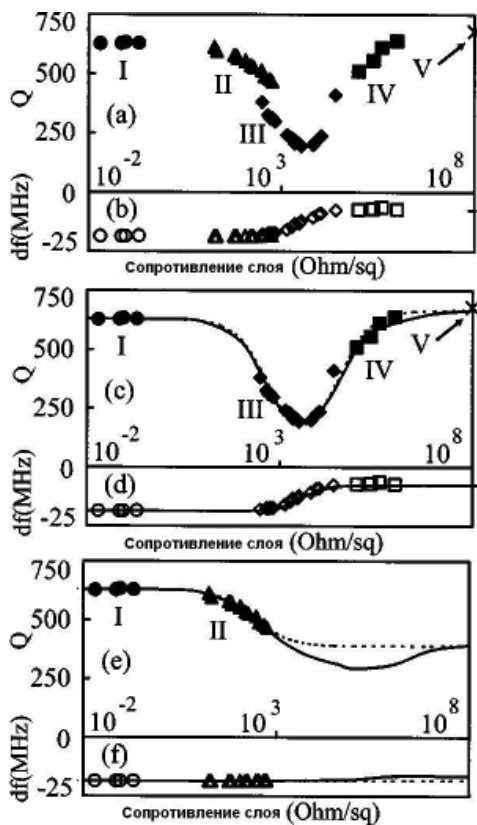


Рис. 2.40

На рис. 2.40, *a* приведена зависимость добротности Q и на рис. 2.40, *b* — изменения частоты f_r от сопротивления. Цифрой I обозначены данные для металла, II — для эпитаксиально легированного кремния, III — ИТО, IV — CuO, V — сапфировая подложка, *a*, *c*, *e* — добротность, *b*, *d*, *f* — резонансные частоты. Изменение f_r и Q могут быть определены с помощью следующих соотношений:

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = -\frac{\Delta C}{2C}, \quad Q + \Delta Q = 2\pi f_r (C + \Delta C)(R + \Delta R),$$

где C и R — емкости и сопротивления, вызываемые взаимодействием кончика зонда с образцом Δf_r , ΔQ , ΔC , ΔR , изменение f_r , Q , C , R . Уравнение для $\Delta f_r / f_r$ справедливо при условии $\Delta f_r \ll f_r$. Уравнение для $Q + \Delta Q$ следует из условия $Q = 2\pi f_r C$, R для параллельной LCR-цепи. Авторы [23] для расчета зависимостей Q и Δf_r от сопротивления использовали метод конечных элементов. Результаты расчета показаны на рис. 2.40, *c* и 2.40, *d* для сапфировой подложки и 2.40, *e* и 2.40, *f* — для кремниевой подложки с объемным сопротивлением 4 Ом · см сплошной линией. Авторы [23] отмечают, что необходимо при измерениях учитывать факт влияния на результат измерений типа подложки.

Авторы [23] отмечали также возможность выявления с помощью этого микроскопа скрытых дефектов при изготовлении полупроводниковых структур.

Список литературы к главе 2

1. *Anlage S.M., Steinhauer D.E., Feenstra B.J., Vlahacos C.P., Wellstood F.C.* Near-Field Microwave Microscopy of Materials Properties // Microwave Superconductivity. Amsterdam: Kluwer, 2001. P. 239–269.
2. *Imtiaz A., Anlage S., Novel A.* Microwave Frequency Scanning Capacitance Microscope // Ultramicroscopy. 2003. V. 94, № 3–4. P. 209–216.
3. *Feenstra B.J., Vlahacos C.P., Thanawalla A.S., Steinhauer D.E., Dutta S.K., Wellstood F.C., Anlage S.M.* Near-Field Scanning Microwave Microscopy: Measuring Local Microwave Properties and Electric

Field Distributions // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest. 1998. P. 965–968.

4. Dutta S.K., Vlahacos C.P., Steinhauer D.E., Thanawalla A.S., Feenstra B.J., Wellstood F.C., Anlage S.M., Newman H.S. Imaging Microwave Electric Fields Using a Near-Field Scanning Microwave Microscope // Appl.Phys.Lett. 1999. V. 74, № 1. P.156–158.

5. Гордиенко Ю.Е., Рябухин А.А., Слипченко Н.И., Ананьин В.В. Резонаторный зонд ближнеполевого сканирующего микроволнового микроскопа // 15-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конф. 12–16 сент. 2005. Севастополь. Крым. Украина. М.; Киев; Минск; Севастополь: Вебер, 2005. С. 721–722.

6. Wei T., Xiang X.-D., Wallace-Freedman W.G., Schultz P.G. Scanning tip microwave near-field microscope // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68, № 24. P. 3506–3508.

7. Устройство для измерений диэлектрической проницаемости материалов: А.с. 1114979 СССР / Усанов Д.А., Вагарин А.Ю., Безменов А.А.; заявитель Саратовский ун-т; опубл. 07.08.84. Бюл. № 35. Приоритет 22.06.82.

8. Усанов Д.А., Коротин Б.Н. Устройство для измерения толщины металлических пленок, нанесенных на диэлектрическую основу // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 1. С. 254.

9. Усанов Д.А., Безменов А.А., Коротин Б.Н. Устройство для измерения толщины диэлектрических пленок, нанесенных на металл // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 4. С. 227–228.

10. Усанов Д.А. Эффект детектирования в полупроводниковых усилителях и генераторах и его использование для создания датчиков для СВЧ-измерений // Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками и полупроводниково-диэлектрическими структурами: тр. II Всесоюз. школы-семинара. 4–10 сент. 1988 г. Ч. 1. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1988. С. 164–170.

11. Imtiaz A., Polak M., Anlage S.M., Barry J.D., Meingalis J. Near-field microscopy on nanometer length scales // J.Appl.Phys. 2005. V.97, №4. 044302 (6 pag.).

12. Lee K.J., Kim J.Y., Yoo H.J., Yang J.I., Kim S.H. Near-field Scanning, Microwave Microscope Using Dielectric Resonator. Pat. USA №US7,130,755B2. Data of patent Oct.31, 2006. Prior Publ. Data Nov. 3. 2005.

13. *Imtiaz A., Anlage S.* Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // *J.Appl.Phys.* 2006. № 100. 044304 (8 pag.).

14. *Gao C., Hu B., Zhang P., Huang M., Liu W., Takeuchi I.* Quantitative microwave evanescent microscopy of dielectric thin films using a recursive image charge approach // *Appl.Phys.Lett.* 2004. V. 84, № 23. P. 4647–4650.

15. *Imtiaz A., Baldwin T., Nembach H.T., Wallis T.M., Kabos P.* Near-field microwave microscope measurements to characterize bulk material properties // *Appl.Phys.Lett.* 2007. V. 90, № 24. 243105 (3 pag.).

16. *Tabib-Azar M., Wang Y.* Design and Fabrication of Scanning Near-Field Microwave Probes Compatible With Atomic Force Microscopy to Image Embedded Nanostructures // *IEEE Trans. MTT.* 2004. V.52, № 3. P. 971–979.

17. *Ju Y., Hamada M., Kobayashi T., Soyama H.* A microwave probe nanostructure for atomic force microscopy // *Microsyst.Technol.* 2009. V.15, № 8. P. 1195–1199.

18. *Karbassi A., Paulson C.A., Kozyrev A.B., Banerjee M., Wang Y., Weide D.W.* Quadraxial probe for high resolution near-field scanning rf/microwave microscopy // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89, № 15. 153113 (3 pag.)

19. *Hovsepyan A.B.* Evaluation of Local Photoconductivity of Solar Cells by Microwave Near-Field Microscopy Technique // *Journal of Contemporary Physics.* 2009. V. 44, № 4. P. 174–177.

20. *Imtiaz A., Anlage S.M., Barry J.D., Melngailis J.* Nanometer-scale material contrast imaging with a near-field microwave microscope // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90, № 14. 143106 (3 pag.).

21. *Hong S., Kim J., Park W., Lee K.* Improved surface imaging with a near-field scanning microwave microscope using a tunable resonator // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 80, № 3. P. 524–526.

22. *Coello V., Villagomez R., Cortes R., Lopez R., Martinez C.* Near-field microscopy of evanescent microwaves // *Revista Mexicana de Fisica.* 2005. V. 51, № 4. P. 426–430.

23. *Wang Z., Kelly M.A., Shen Z.-X., Shao L., Chu W.-K., Edwards H.* Quantitative measurement of sheet resistance by evanescent microwave probe // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86, № 15. 153118 (3 pag.).

ГЛАВА 3. БЛИЖНЕПОЛЕВЫЕ СВЧ-МИКРОСКОПЫ С ЗОНДАМИ В ВИДЕ МАГНИТНОЙ ПЕТЛИ СВЯЗИ

Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с зондом в виде магнитной петли связи авторы [1] использовали для локальных измерений нелинейного СВЧ-отклика пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Такие измерения представляют практический интерес в связи с тем, что при высоких уровнях СВЧ-мощности нелинейные свойства устройств, принцип действия которых основан на эффекте высокотемпературной сверхпроводимости, приводят к появлению интермодуляционных искажений сигнала, генерации высших гармоник основной частоты и росту СВЧ-потерь, что ограничивает области применения сверхпроводящих СВЧ-устройств. Нелинейный СВЧ-отклик в использовавшемся авторами [1] микроскопе регистрировался с помощью зонда «индуктивного» типа. Этот зонд 4 представлял собой металлическую проволоку 5 длиной 1 мм и диаметром 50 мкм, соединяющую внешний и внутренний проводники коаксиального кабеля (рис.3.1).

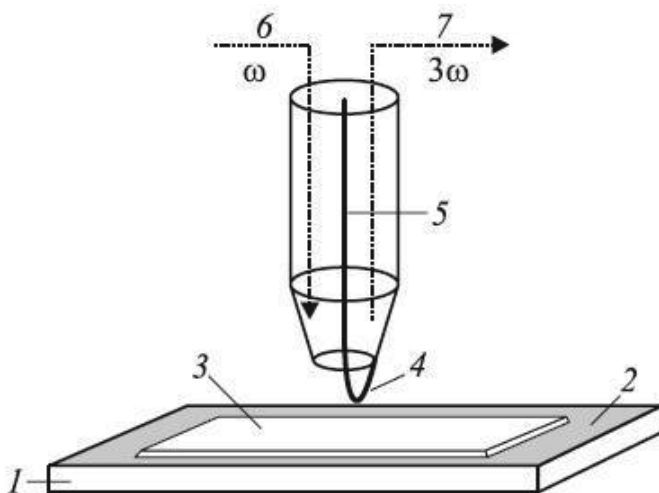


Рис. 3.1

Рабочая частота была равна 472 МГц. При подаче на зонд СВЧ-сигнала текущий по нему ток создает квазистатическое магнитное

поле. Генерируемые сверхпроводящей пленкой гармоники принимаются зондом. Уровень падающей мощности на основной частоте составлял 100 мВт. Достигнутое пространственное разрешение — 50 мкм. Для предотвращения электрического контакта зонда с исследуемым образцом I , приводящего к генерации паразитного сигнала на частоте третьей гармоники, на образец помещалась тефлоновая пленка 3 толщиной 10 мкм. После прохождения через циркулятор мощность третьей гармоники 7 измерялась приемником, и ее значение считывалось компьютером. Использовалась система позиционирования, которая позволяла проводить сканирование образца в плоскости пленки. Управление этой системой также осуществлялось с помощью компьютера (рис. 3.2) [2].

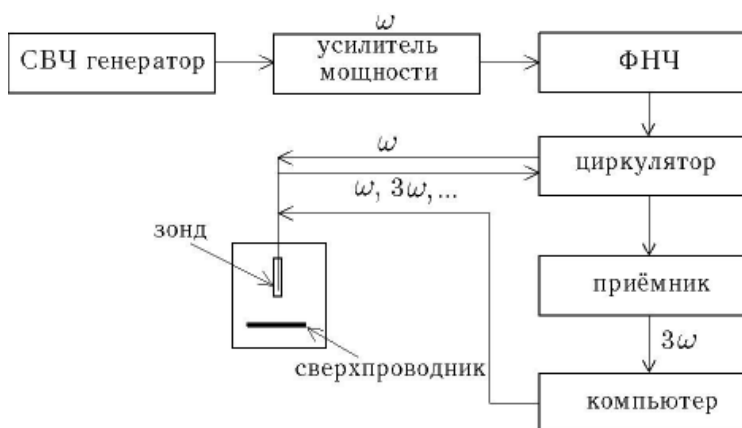


Рис. 3.2

В работе [3] показана возможность применения ближнеполевого СВЧ-микроскопа для локальных измерений физических параметров ферромагнитных материалов. Использовался зонд на основе коаксиальной линии. Конец зонда представлял собой петлю, образованную в результате спаивания внутреннего проводника с внешним проводом диаметром 25 мкм. Для возбуждения магнитного поля h_{rf} использовали катушку из медного провода толщиной 500 нм, намотанную на внешний проводник коаксиала. В качестве петли связи использовалась также тонкая медная пленка шириной от 100 до 300 мкм. Схе-

матическое изображение зонда и эквивалентного контура приведены на рис. 3.3, где L_0 — индуктивность петли, Z_s — поверхностный импеданс исследуемого образца. Общий импеданс может быть определен по СВЧ-коэффициенту отражения, который измеряется с помощью векторного анализатора.

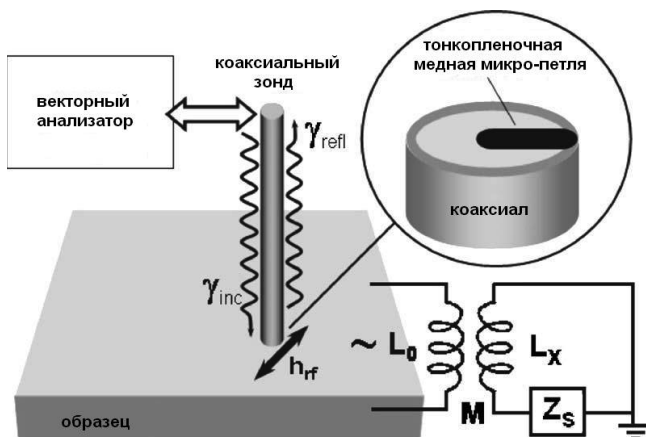


Рис. 3.3

Список литературы к главе 3

1. Ноздрин Ю.Н., Пестов Е.Е., Курин В.В., Барыщев С.В., Бобыль А.В., Карманенко С.Ф., Саксеев Д.А., Сурис Р.А. Влияние микроструктуры эпитаксиальных пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на их электрофизические и нелинейные СВЧ-свойства // Физика твердого тела. 2006. Т. 48, вып. 12. С. 2136–2145.
2. Аладышкин А.Ю., Андронов А.А., Пестов Е.Е., Пестов Ю.Н., Ноздрин Ю.Н., Курин В.В., Куколо А.М., Монако Р., Боффа М. Исследование нелинейного СВЧ-отклика сверхпроводников с помощью локальной методики // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 2. С. 123–143.
3. Mircea D.I., Clinton T.W. Near-field microwave probe for local ferromagnetic resonance characterization // Appl.Phys.Lett. 2007. V. 90, № 14. 142504 (3pag.).

ГЛАВА 4. БЛИЖНЕПОЛЕВЫЕ СВЧ-МИКРОСКОПЫ С ЗОНДОМ В ВИДЕ ПЛОСКОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Использование в качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа плоских линий передачи интересно перспективой уменьшения его размеров, повышения локальности и чувствительности. Авторы [1] предложили в качестве такого зонда использовать отрезок конусообразной копланарной линии с подложкой из искусственного сапфира, соединенной с полуволновым резонатором (рис. 4.1; 4.2).

Полоски копланарной линии изготавливались из алюминия. Ширина центральной полоски на конце зонда составляла 100 мкм. Промежуток между центральной и внешней полосками при этом был равен 150 мкм.

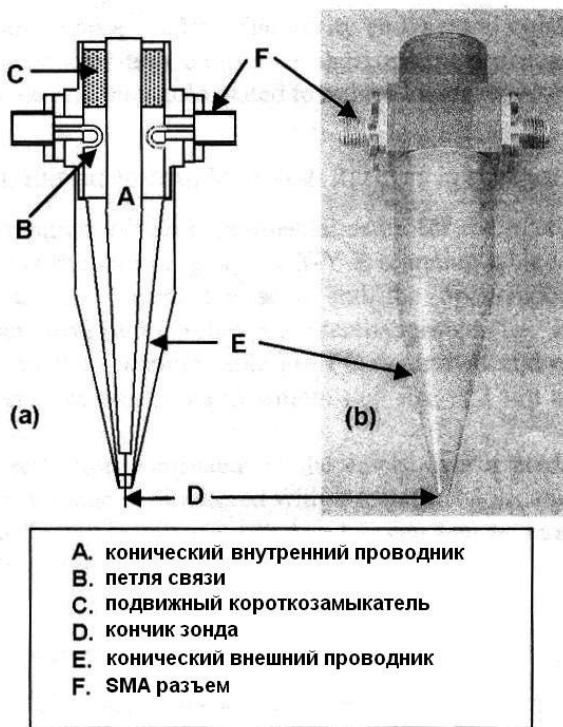


Рис. 4.1

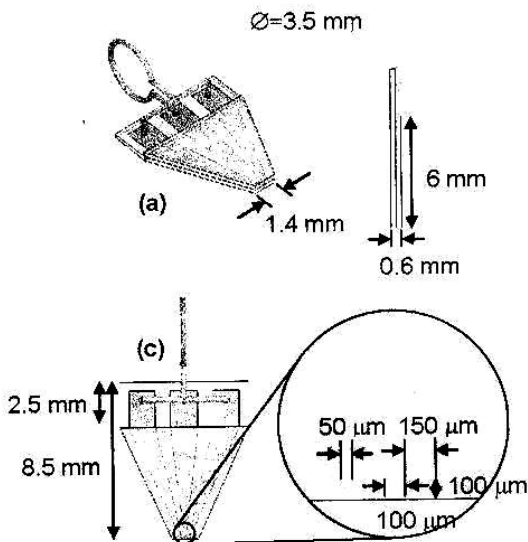


Рис. 4.2

Для сохранения волнового сопротивления на уровне 50 Ом ширина полосок сначала увеличивалась до 1,5 мм, а затем уменьшалась до 0,8 мм. Копланарная линия подключалась к резонатору через петлю связи. Предложенный зонд был использован для сканирования медной полоски шириной 500 мкм. Шаг сканирования составлял 25 мкм. Авторы [1] характеризовали своё устройство как надежное в эксплуатации и характеризующееся высокой разрешающей способностью.

Оригинальная конструкция зонда была предложена авторами [2]. Этот зонд конструктивно представлял собой брусок из кварца с уменьшающейся к концу площадью поперечного сечения. На две противоположные стороны бруска нанесены слои из Al, образующие полосковую линию (рис. 4.3).

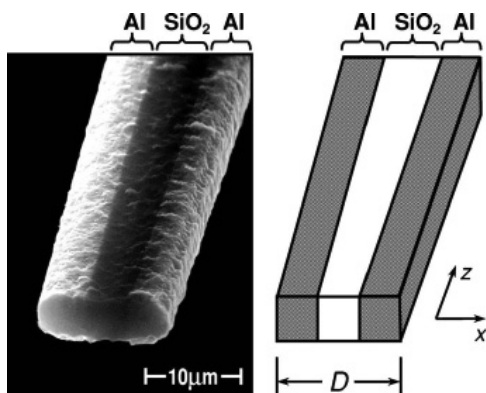


Рис. 4.3

Предложенный зонд обладает свойствами резонатора на частоте 4 ГГц, являющейся рабочей частотой для микроскопа данного типа. СВЧ-излучение вводится в резонатор с помощью магнитной петли связи (рис. 4.4).

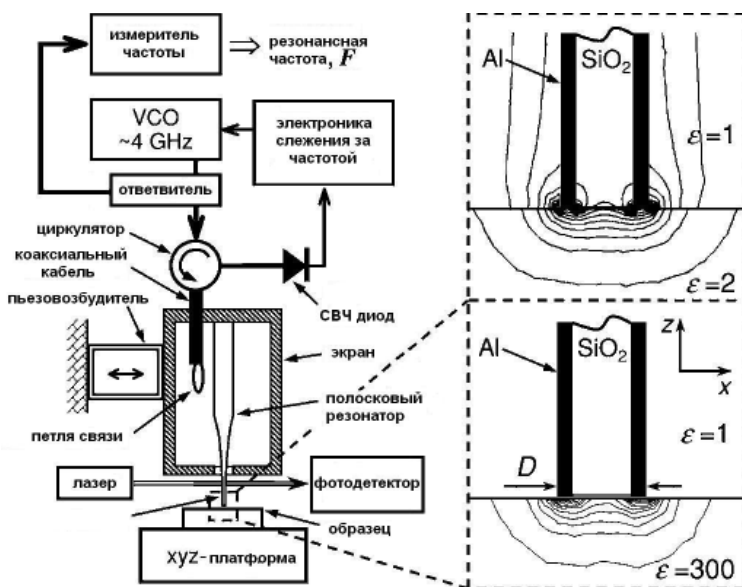


Рис. 4.4

Изменение распределения ближнего поля под зондом при подведении его к исследуемым образцам с различной диэлектрической проницаемостью ϵ иллюстрируется результатами, приведенными на вставке к рис. 4.4.

Авторами [2] сообщалось о необходимости повышения стабильности по частоте используемого источника СВЧ-сигнала. Для этого они применили систему для компенсации температурного ухода частоты. Контроль расстояния зонд — образец осуществляется с помощью лазерной системы, что позволяет обеспечить точность ~ 2 нм. На рис. 4.5, *a* показана зависимость сдвига резонансной частоты зонда от расстояния Z между зондом и исследуемым образцом из низкоомного кремния, нормированного к размеру острия зонда D ($D \sim 10$ мкм). На рис. 4.5, *b* представлены результаты измерений сдвига частоты ΔF от x/D поперек края медного слоя, покрытого диэлектрическим слоем ϵ_{film} толщиной 414 нм.

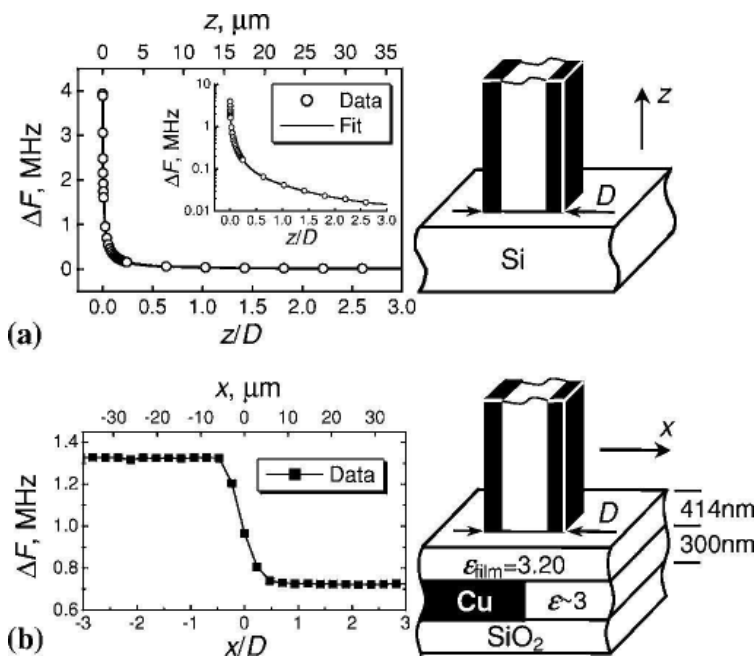


Рис. 4.5

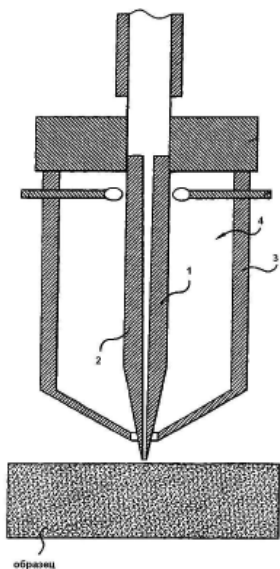


Рис. 4.6

максимальной на рабочей частоте. При расстоянии ~ 10 мм $Q > 1000$ на частоте 10 ГГц. Связь СВЧ-генератора и детектора с зондом может обеспечиваться с помощью петель связи 4, 5. В [4] представлена конструкция ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа с чувствительным зондом, совмещенным с атомно-силовым микроскопом. Предложенный авторами [4] микроскоп имел рабочую частоту 1 ГГц. Специфическим свойством предложенного микроскопа является то, что в нем существуют раздельно передающая линия для возбуждения СВЧ-поля и линия для индикации. СВЧ-датчик укреплен на кантилере атомно-силового микроскопа. В качестве линий передачи использовались две копланарные линии, размещенные на кремниевой подложке. Радиус кончика зонда составлял ~ 50 нм. На рис. 4.7 приведены результаты расчета эквипотенциальных линий для острого Pt кончика зонда, расположенного вблизи от поверхности диэлектрического образца с $\epsilon = 4$. На рис. 4.7, *a* показана зависимость отклика микроскопа на диэлектрической проницаемости образца, на рис. 4.7, *b* — аналогичный отклик на изменение расстояния между возбуждающим зондом и образцом.

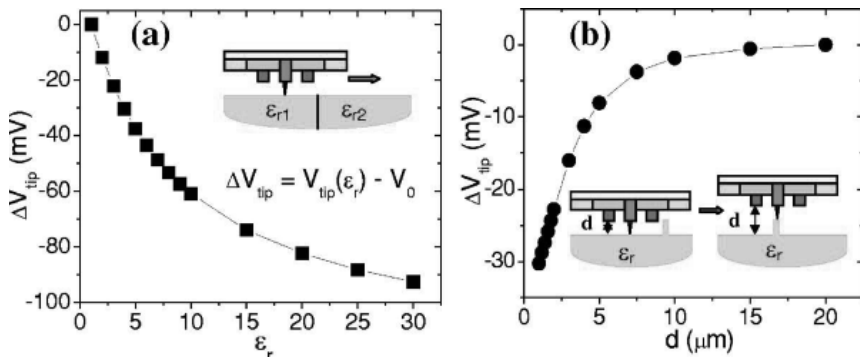


Рис. 4.7

Авторы [4] показали возможность исследовать диэлектрический контраст, скрытый слоем однородного диэлектрика. Исследуемые структуры показаны на рис. 4.8.

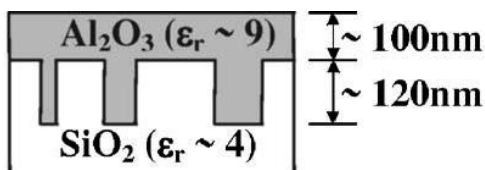


Рис. 4.8

Пространственное разрешение составляло 120 нм. Была продемонстрирована также возможность получать с помощью предложенного микроскопа изображения наночастиц и нанотрубок с размерами менее 100 нм, а также изображения биообъектов на примере легких *Drosophila*.

Список литературы к главе 4

1. Valente L.A., Haigh A.D., Gibson A.P., Parkinson G., Jacova G., Withers P.U., Coopen-Holmes R. Coplanar Waveguide Scanning Micro-

ware Profiler // Proc. 37-th European Microwaves Conf. 8–12 Okt. 2007. Munich, Germany. P. 194–197.

2. *Talanov V.V., Scherz A., Moreland R.L., Schwarz A.R.* A near-field scanned microwave probe for spatially localized electrical metrology // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88, № 13. 134106 (3 pag.).

3. *Moreland R.L., Christem H.M., Talanov V.V., Schwartz A.R.* Apertured probes for localized measurements of a material's complex permittivity and fabrication method. Pat. EP1408327 (A2). Publis. data of patent 14 apr. 2004. Prior. 16 sep. 2003.

4. *Lai K., Ji M.B., Leindecker N., Kelly M.A., Shen Z.X.* Atomic-force microscope-compatible near-field scanning microwave microscope with separated excitation and sensing probes // Rev. of Scientific Instruments. 2007. V. 78, № 6. 063702.

ГЛАВА 5. БЛИЖНЕПОЛЕВЫЕ СВЧ-МИКРОСКОПЫ С ЗОНДОВЫМИ СИСТЕМАМИ ТИПА «ПЕТЛЯ СВЯЗИ — ПРОВОЛОЧНЫЙ ЗОНД», «МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ШТЫРЬ С ЕМКОСТНЫМ ЗАЗОРОМ»

Авторы [1] в качестве недостатков известных ранее микроскопов отмечали, в частности, большие габариты, чувствительность к состоянию окружающей среды (например, к температуре). Для устранения этого недостатка и повышения чувствительности наряду с разрешающей способностью они предложили использовать в микроскопе диэлектрический резонатор и выходящий за его пределы через отверстие в резонаторе проволочный зонд. Блок-схема предложенного микроскопа приведена на рис. 5.1. Она включает в себя центральный процессор 1, генератор СВЧ 2, детектор 3, блок перемещения диэлектрического резонатора 4, диэлектрический резонатор 5, зонд 6 и блок обработки информации 7.

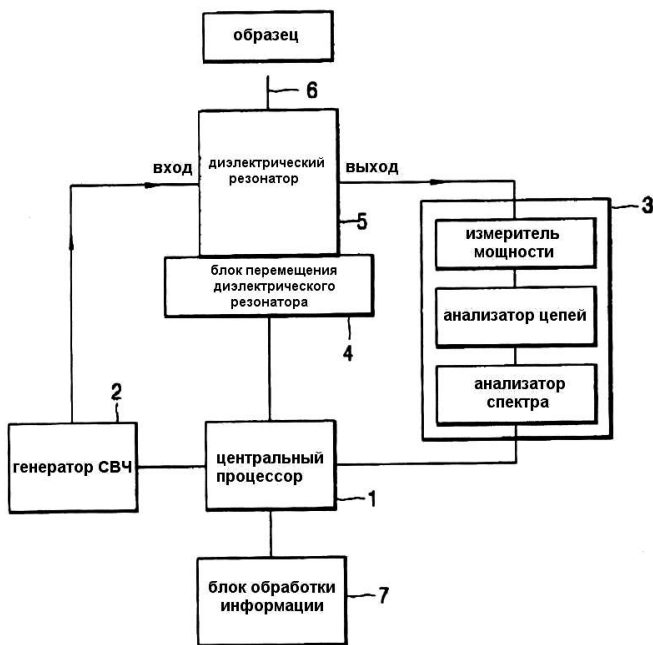


Рис. 5.1

Генератор СВЧ мог генерировать как одну частоту, так и спектр частот. Диэлектрический резонатор включал в себя диэлектрик, окружающий его металлический экран, входной и выходной элементы связи резонатора с детектором и через зонд с образцом. Элементы связи могут иметь форму петель. Микроскоп может включить в себя узел поворота для регулировки частоты и добротности резонатора. Регулировка осуществляется с помощью винта, который вводится вглубь диэлектрика. Конец зонда выполняется изогнутым для образования петли связи. В качестве диэлектрика, из которого изготавливался резонатор, авторы [1] использовали $\text{Ba}(\text{ZrTa})\text{O}_3$, имеющий диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = 29$.

Изображение диэлектрического резонатора приведено на рис. 5.2. Он включает в себя диэлектрик 1, металлический экран 2, входной и выходной элементы связи 3, 4, поворотный винт 5, установленный со стороны верхней поверхности 2. Диэлектрик 1 имеет внутреннюю полость 6.

Сечение резонатора изображено на рис. 5.3. Здесь регулирующий винт 5, обращенный торцом к диэлектрику, проходит через экран 2 в полость 6. Зондирующий проводник 7 также связан с резонатором через петлю связи. Диаметр диэлектрика составлял 14 мм, высота — 5–8 мм. Когда петли связи находятся в горизонтальной плоскости, то резонансная частота составляла 4,5 ГГц. Авторы [1] продемонстрировали возможность регулировки частоты от 4,7 до 46 ГГц и добротности от 10000 до 35000. Оценка разрешающей способности микроскопа, приведенная авторами, составила 1 мкм.

Как уже отмечалось, своего рода «сердцем» ближнеполевого СВЧ-микроскопа является связанный с зондовой системой резонатор, обеспечивающий высокую чувствительность микроскопу. В работах [2, 3] была показана возможность создания СВЧ-резонаторов на основе систем «штырь с зазором — близко расположенный короткозамыкатель» и обнаружена их высокая чувствительность к возмущающим воздействиям. Резонансы в таких системах объяснены возбуждением в них высших типов колебаний. Так как один из размеров такого рода резонаторов намного меньше длины волны основного типа, они были названы «низкоразмерными» [4]. Ясно, что вносимое в такой низкоразмерный резонатор малое «возмущение», изменяющее его «электрическую длину», должно приводить к значительному изменению его характеристик, что и демонстрировалось в работах [5, 6]. Конструкция резонатора в совокупности с зондовым

элементом для ближнеполевого СВЧ-микроскопа описана в работе [7] и приведена на рис. 5.4.

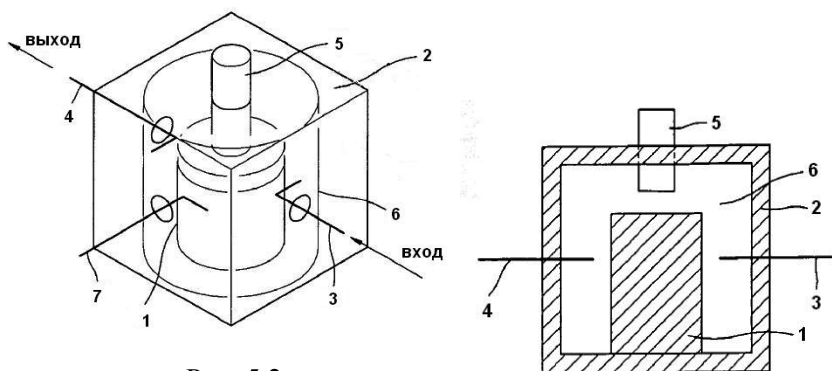


Рис. 5.2

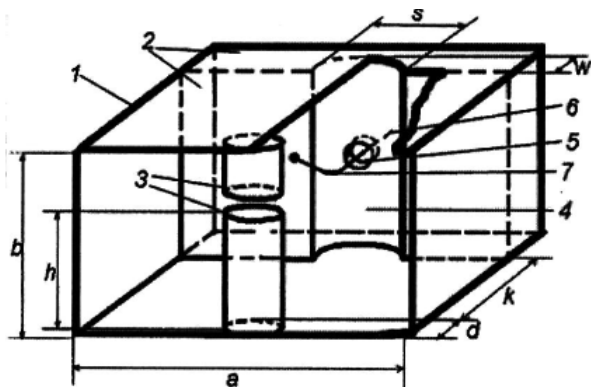


Рис. 5.4

Она включает в себя прямоугольный волновод 1 с подключаемым к нему СВЧ-генератором, имеющий короткозамыкатель 2 . В непосредственной близости от короткозамыкателя в центральной части на одной из широких стенок волновода параллельно короткозамыкателю располагается металлический штырь. Высота штыря h меньше размера узкой стенки волновода b , так что между штырем и другой широкой стенкой имеется зазор. Короткозамыкатель 2 имеет на по-

верхности, обращенной внутрь волновода, полукруглую выемку 4, по всей его ширине параллельную штырю, и отверстие 5. В выемке коаксиально расположен выступающий за пределы волновода 1 зонд в виде иглы 6, с помощью петли связи 7 гальванически соединенный с короткозамыкателем 2. Расстояние от штыря 3 до короткозамыкателя 2 и величина зазора выбираются из условия возникновения резонанса, с малым коэффициентом отражения на резонансной частоте. Авторы [7] установили, что с помощью такого устройства можно проводить локальные измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне $1,5 \div 400$, проводимости — в диапазоне $2 \cdot 10^{-2} \div 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ без дополнительной перестройки резонаторной системы. В приведенном в [7] примере реализации описанного устройства использовался СВЧ-генератор, работающий в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Размер широкой стенки волновода составлял $a=23$ мм, узкой $b=10$ мм, $R=6.5$ мм, высота зазора в штыре была равна 1 мм, радиус иглы — 0,1 мм, расстояние K между штырем и короткозамыкателем не более $\lambda/10$, где λ — длина волны основного типа в волноводе, характеризующие выемку размеры S и W были соответственно равны 7 и 2,15 мм.

Разрешающая способность при использовании ближнеполевых СВЧ-микроскопов может быть повышена при увеличении рабочей частоты СВЧ-генератора. Авторы [8] использовали в микроскопе источник излучения с рабочей частотой ~ 60 ГГц и резонатор с повышенной добротностью и более чувствительным зондом по сравнению с известными разработками. Авторы [8] отметили преимущество конструкции с металлическим зондом по сравнению с устройством, в котором зондирование осуществляется с помощью щели. Зондирующая часть в предложенном авторами [8] устройстве представляла собой волноводный резонатор, связанный с помещенным в него зондом, как это показано на рис. 5.5, а.

На рис. 5.5, б показана блок-схема созданного авторами ближнеполевого микроскопа.

Перестройка частоты резонатора могла осуществляться с помощью подвижного короткозамыкающего поршня. При использовании теории возмущений для изменения частоты резонатора получается выражение

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{-2h\pi r_0^2}{abl},$$

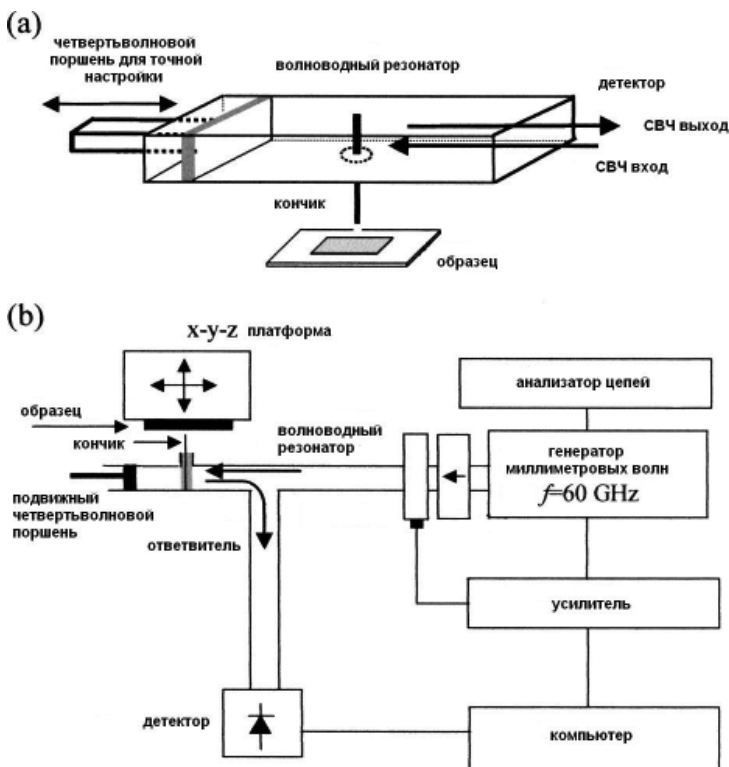


Рис. 5.5

где a и b — размеры волновода, h — длина, r_0 — радиус зонда внутри волновода, l — продольный размер резонатора, f_0 — рабочая частота резонатора без зонда. Таким образом, правая часть этого уравнения представляет собой отношение объема металлического зонда в волноводе к объему невозмущенного резонатора. При помещении исследуемого образца вблизи кончика зонда изменяется резонансная частота и добротность резонатора. По изменению этих параметров судят о характеристиках образца. В качестве источника излучения авторы [8] использовали генератор на диоде Ганна. Кончик зонда методом химического травления доводился до величины диаметра $0,5 \text{ мкм}$.

На рис. 5.6 приведены фотографии трех зондов с различными типами кончиков: a — угол конуса 10° , b — угол конуса 30° , c — угол конуса 30° и увеличенная площадь вершины конуса.

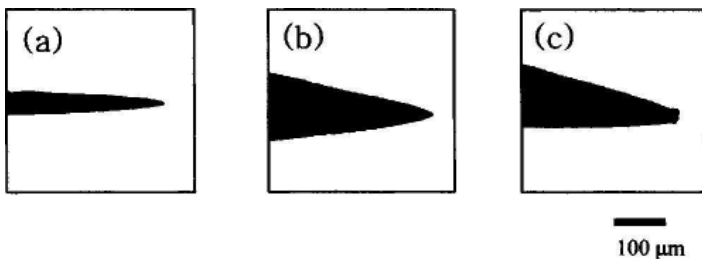


Рис. 5.6

На рис. 5.7 показано оптическое изображение тонкого слоя Cr на стеклянной подложке (a). Расстояние зонд–подложка составляло 1 мкм. Толщина слоя Cr — 100 нм.

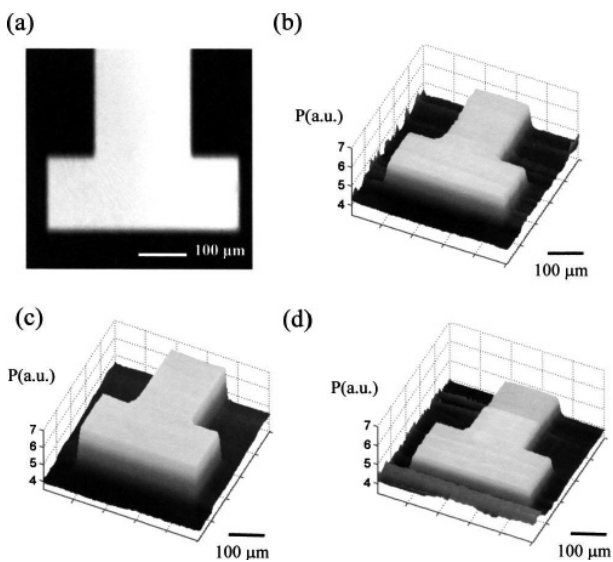
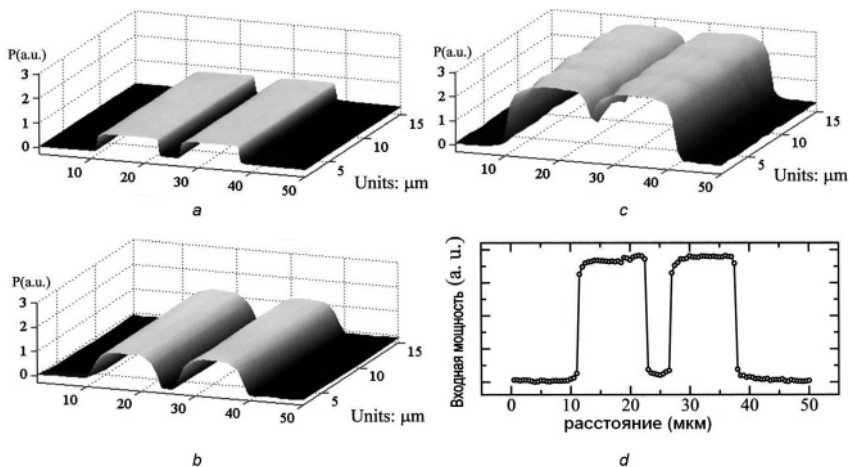


Рис. 5.7

На этом же рисунке приведены изображения этой же структуры, полученные с помощью ближнеполевого микроскопа на частотах 59,87 ГГц (b), 60 ГГц (c) и 61,13 ГГц (d). Из сопоставления полученных изображений следует, что наиболее высокое пространственное разрешение и контраст изображения получается для рабочей ча-



стоты 60 ГГц. Достигнутое в этом случае пространственное разрешение составляло 2 мкм.

Авторы [8] исследовали также зависимость характеристик изображения (рис. 5.8), полученного с помощью ближнеполевого микроскопа для различных типов кончиков зонда, приведенных на рис. 5.6, *a*, *b*, *c*.

Рис. 5.8

В результате ими на примере изображения тонкого слоя на подложке MgO показано, что с увеличением площади зонда от (*a*) к (*b*) чувствительность повышается, но при этом уменьшается контрастность. При увеличении площади вершины конуса (*c*) чувствительность еще более возрастает, но падает контрастность.

Рис. 5.8, *d* иллюстрирует возможность с использованием зонда, изображенного на рис. 5.6, *a*, на рабочей частоте фиксировать наличие выреза в тонком слое толщиной в 1 мкм.

В электронной технике при конструировании ламп бегущей волны используются в качестве конструктивных элементов диэлектрические стержни с нанесенным на поверхность слоем поглощающего СВЧ-излучение материала. Однородность нанесения этого слоя важно контролировать с высокой степенью разрешающей способности. В [9] описано устройство, позволяющее успешно решить эту задачу (рис. 5.9).

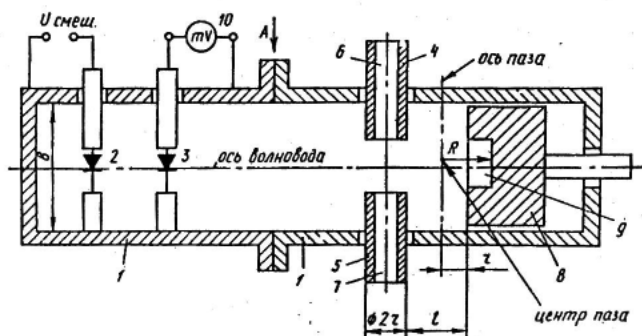


Рис. 5.9

Принцип действия устройства (см. рис. 5.9) основан на использовании явления резонанса в волноводной системе 1 «металлический стержень 5 с зазором — близкорасположенный короткозамыкающий поршень 8». Исследуемый диэлектрический элемент помещается в специально выполненное отверстие 6, 7 вдоль оси металлического стержня. На характеристики резонанса оказывают сильное влияние параметры подлежащего контролю участка слоя поглотителя, который находится в зазоре. Продвигая диэлектрический стержень вдоль оси полого металлического цилиндра, можно контролировать однородность нанесения поглотителя вдоль всей длины. Для повышения чувствительности такого типа устройство в короткозамыкателе был выполнен паз 9 в виде части поверхности цилиндра, ось которого параллельна поверхности оси металлического стержня. Контроль толщины поглотителя осуществлялся по результатам обработки СВЧ-сигнала, генерируемого активным элементом 2 и протектированного детектором 3.

Список литературы к главе 5

1. Lee K.J., Kim J.Y., Yoo H.J., Yang J.I., Kim S.H. Near-field Scanning, Microwave Microscope Using Dielectric Resonator. Pat. USA № US7,130,755B2. Data of patent: Oct. 31, 2006. Prior Publ. Data: Nov. 3. 2005.

2. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Волноводный измерительный резонатор // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2002. Т. 45, № 9. С. 26–28.
3. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системах диафрагма — короткозамыкающий поршень // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2001. Т. 4, № 3. С. 13–20.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системе диафрагма — короткозамыкающий поршень // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 12. С. 1046–1049.
5. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Электрически управляемый низкочастотный СВЧ-резонатор // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 3. С. 100–102.
6. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Управляемый магнитным полем СВЧ-выключатель на рпн диодах // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 1. С. 72–73.
7. Устройство для измерения параметров материалов: Пат. 2373545 РФ / Усанов Д.А., Горбатов С.С., Сорокин А.Н., Кваско В.Ю.; Заявитель Саратовский ун-т. Оpubл. 20.11.2009. Бюл. № 32. Приоритет 3.06.2008.
8. Kim M., Kim J., Kim H., Kim S., Yang J., Yoo H., Kim S., Lee K., Fridman B. Nondestructive high spatial resolution imaging with a 60 GHz near-field scanning millimeter-wave microscope // Rev. of Scientific Instruments. 2004. V. 75, № 3. P. 684–688.
9. Устройство для измерения параметров материалов: А.с. № 788039 СССР / Усанов Д.А., Лицов А.А., Феклистов В.Б., Тупикин В.Д., Вагарин А.Ю.; Заявитель Саратовский ун-т.; Оpubл. 07.02.91, Бюл. № 5. Приоритет от 16.03.89.
10. Устройство для измерений диэлектрической проницаемости материалов: А.с. 1114979 СССР / Усанов Д.А., Вагарин А.Ю., Безменов А.А.; Заявитель Саратовский ун-т.; Оpubл. 07.08.84. Бюл. № 35. Приоритет 22.06.82.
11. Устройство для измерения толщин: А.с. 1450602 СССР / Усанов Д.А., Коротин Б.Н., Орлов В.Е.; Оpubл. 07.08.88. Бюл. № 29. Приоритет от 11.08.86.
12. Устройство для измерения параметров материалов: А.с. 1493939 СССР / Усанов Д.А., Лицов А.А.; Оpubл. 15.07.89. Бюл. № 26. Приоритет от 26.10.87.
13. Усанов Д.А., Лицов А.А. Резонансное затухание СВЧ-мощности в полубесконечном волноводе, содержащем штырь с зазором // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1986. Т. 20, № 3. С. 53–58.

ГЛАВА 6. ПРИМЕНЕНИЕ БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ-МИКРОСКОПИИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

С помощью ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов можно измерять геометрические размеры и визуализировать структуру объектов с разрешающей способностью в единицы нанометров. Несмотря на то, что измеряются нанометры, а не микроны, такие приборы по-прежнему называются микроскопами, в частности, атомно-силовой сканирующий микроскоп, туннельный сканирующий микроскоп и т.д. Использование таких микроскопов открыло новые возможности визуализации объектов биологии и медицины. Недостатком туннельного и атомно-силового микроскопов является то, что они не позволяют фиксировать изменение физических характеристик объектов, что может иметь важное значение при исследовании живых систем. Этому недостатка лишен сканирующий ближнеполевой СВЧ-микроскоп. Таким образом, при исследовании биообъектов открываются новые возможности получения информации об изменении физических характеристик биообъектов с недостижимой ранее локальностью, либо о характеристиках малого объема биоматериалов. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп может быть совмещен с туннельным или атомно-силовым. Сканирование объекта в ближнеполевом СВЧ-микроскопе осуществляется с помощью зонда, который чаще всего представляет собой отрезок коаксиальной линии с центральным проводником, выступающим за пределы внешнего.

А.Н. Резником и Н.В. Юрасовой [1] было предложено ближнеполевую СВЧ-микроскопию использовать для неинвазивного зондирования распределения температуры биологических сред. Исходной предпосылкой применимости для этой цели метода ближнеполевой СВЧ-микроскопии было сделанное этими авторами предположение о зависимости комплексной диэлектрической проницаемости биологических сред от температуры T . В задаче температурной диагностики тела человека необходимо иметь пространственное разрешение на поверхности не менее 1–2 см при глубине зондирования не менее 3–5 см. Схема использовавшегося авторами [1] ближнеполевого локатора (БПЛ) изображена на рис. 6.1.

Зонд служил антенной БПЛ, размер его апертуры был мал по сравнению с длиной волны измерения. Для повышения чувстви-

тельности устройства антенна A подключалась к волноводному входу рефлектометра P через согласующий резонатор (CP), причем на резонансной частоте f_0 достигалось идеальное согласование $\Gamma(f_0) = 0$, где Γ — коэффициент отражения от входа антенны. В этом случае откликом на возмущение диэлектрической проницаемости (ϵ) является сдвиг частоты f_0 . Соответствующие вариации $\Delta\Gamma$ будут в области максимальной крутизны амплитудно-частотной характеристики зонда, что обеспечивает повышенную чувствительность к изменению ϵ . В случае злокачественных образований действительная и мнимая части ϵ могут в 2–5 раз превышать окружающий их фон [2].

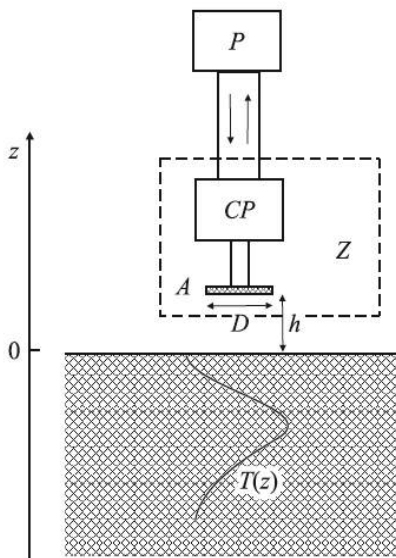


Рис. 6.1

Превышение отклика ближнеполевого локатора над фоновым уровнем позволяет сделать вывод о наличии опухоли. Кроме того, температурный контроль важен и при лечении онкологических заболеваний методом гипертермии. Авторы [2] привели соотношение для нахождения диэлектрической проницаемости двухкомпонентной смеси: сухого диэлектрика и воды с проницаемостями ϵ_d и ϵ_w соответственно:

$$\rho \frac{\epsilon_w(f, T, S) - \epsilon}{\epsilon_w(f, T, S) + 2\epsilon} + (1 - \rho) \frac{\epsilon_d - \epsilon}{\epsilon_d + 2\epsilon} = 0,$$

где проницаемость воды как функция частоты $f = \omega/2\pi$, температуры T и солёности S рассчитывается по формуле

$$\epsilon_w(f, T, S) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s(S, T) - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau(S, T)} - i \frac{\sigma(S, T)}{\omega\epsilon_0}.$$

Входящие в выражение для ϵ_w значения $\epsilon_0 = 1/36\pi \cdot 10^{-9}$ F/m, $\epsilon_\infty = 4,9$. Значения ϵ_s , τ и δ рассчитываются по эмпирическим формулам, приведенным в работе [3]. Контраст ϵ опухоли относительно здоровой ткани составляет 5:1. В качестве зонда использовался ближнеполевой резонатор, который настраивался таким образом, чтобы при контакте со средой коэффициент отражения достигал минимально возможного значения. Тогда попадание в зону видимости антенны контрастного объекта приводит к резкому росту отражения. При нормальной температуре и длине волны 60 см было получено значение диэлектрической проницаемости здоровой жировой ткани $\epsilon = 8,2-2,4 i$ и опухоли $\epsilon_c = 31,2-13,4 i$. Из проведенных авторами [2] оценок следовало, что предложенным методом возможно определять опухоли с линейным размером 5 мм, расположенные на глубинах 2–3 см.

Средняя температура исследуемой среды может быть определена на практике с использованием калибровки БПЛ, который можно назвать ближнеполевым термометром. Отличительной чертой такого ближнеполевого термометра является способность дистанционного определения температуры. Авторы [1] отмечают, что стремление повысить разрешающую способность БПЛ за счет уменьшения диаметра зонда приводит к уменьшению глубины зондирования. В то же время глубину зондирования можно повысить, увеличивая длину волны БПЛ.

Изменение диэлектрической проницаемости вблизи апертуры антенны приводит к изменению ее входного импеданса вследствие возмущения окружающего электромагнитного поля. В результате изменяется коэффициент отражения излучения от входа антенны Γ , который и измеряется. Изменение Γ , равное $\Delta\Gamma$, является информационным параметром о возмущении ϵ и температуры вблизи зонда. Если антенна подключена к рефлектометру через резонатор, то информационным параметром является сдвиг частоты резонатора. Авторы [1] сообщили о возможности достижения чувствительности к изменению температуры $\delta T = 0,1^\circ\text{C}$.

Авторы [4] использовали ближнеполевой сканирующий микроскоп для исследования биологических объектов. В своих исследованиях они использовали микроскоп с рабочей частотой 1,5 ГГц и коаксиальным зондом с вольфрамовым центральным проводником

на конце, выступающим за пределы внешнего проводника коаксиала. Размер острия зонда при представлении его полусферой составлял 2,5 мкм. Коаксиальный зонд соединялся (являлся составной частью) с четвертьволновым коаксиальным резонатором. Такую конструкцию можно назвать коаксиальным резонаторным зондом. Диаметры внутреннего и внешнего проводников, использовавшегося авторами [4] коаксиала, составляли 6 и 20 мм соответственно. Длина четвертьволнового коаксиального резонатора была равна 5 см. Взаимодействие зонда с исследуемым образцом рассчитывалось с помощью теории возмущений, а также численными методами для случая тонкого диэлектрического образца в качестве объекта исследований.

Устройство для осуществления сканирования включало в себя два сканера, обеспечивающих перемещения в плоскости x, y с разрешением в 2,5 мкм. Для предотвращения короткого замыкания и уменьшения воздействия внешних полей на зонд использовалась анодированная алюминиевая пластинка. Авторы [4] в качестве модели для объяснения свойств биологических объектов использовали воду, мотивируя это тем, что диэлектрические свойства большинства биологических объектов определяются содержащейся в них водой. Для изучения этих свойств измеряли сдвиг резонансной частоты f_r и изменение Q с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа. На рис. 6.2, а приведена зависимость резонансной частоты f_r и

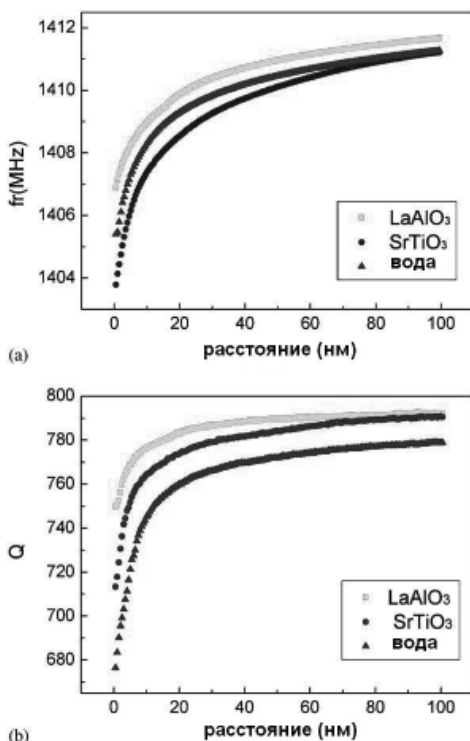


Рис. 6.2

значения Q рис. 6.2, b от расстояния от конца зонда до поверхности чистой деионизованной воды.

Видно, что при приближении конца зонда к воде f_r и Q уменьшаются. Это уменьшение происходит от значений f_{r0} и Q_0 , равных соответственно 1413,8 МГц и 930 и характерных для воздуха в отсутствие жидкости. Для сравнения на этих же рисунках приведены аналогичные зависимости для LaAlO_3 ($\epsilon=24$) и SrTiO_3 ($\epsilon=300$). Эти зависимости подтверждают правомерность выбора воды в качестве модели для исследования биологических объектов. Используя описанный выше микроскоп, авторы [4] получили изображение поверхностных сосудов в костной ткани (рис. 6.3).

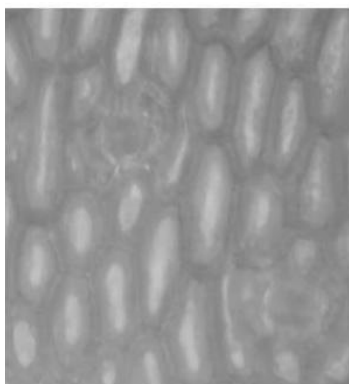


Рис. 6.3

Это стало возможным благодаря тому, что основная часть жидкости в сосудах имеет существенно более высокую диэлектрическую проницаемость чем костная ткань. Изображения получены по изменению f_r (формат 150 мкм x 200 мкм) (см. рис. 6.3) и по изменению Q (формат 150 мкм x 200 мкм) (см. рис. 6.3). Значения f_0 и Q_0 составляли 1409 МГц и 800 соответственно. Авторы [4] привели также результаты измерения свойств раствора NaCl. При этом они использовали зонд с диаметром кончика 240 мкм, чтобы избежать влияния на результат измерений эффекта

поверхностного натяжения.

На рис. 6.4 показано изменение f_r и Q в зависимости от концентрации NaCl в деионизованной воде от малых значений концентрации до состояния насыщения. f_{r0} и Q_0 в отсутствие NaCl составляли значения 1389,4 и 800 соответственно. С увеличением концентрации NaCl полная проводимость воды увеличивается, вследствие этого увеличиваются реальная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости и одновременно уменьшаются f_r и Q . Начиная с некоторого значения концентрации NaCl f_r перестает изменяться, тогда как Q после достижения минимального значения вновь начинает расти с ростом концентрации NaCl. Такой ход зависимости Q объясняется авторами [4] уменьшением потерь

в материале с ростом его проводимости. В результате проведенных исследований авторы [4] сделали вывод о том, что ближнеполевой СВЧ-микроскоп может быть полезным инструментом для изучения диэлектрических свойств биологических объектов.

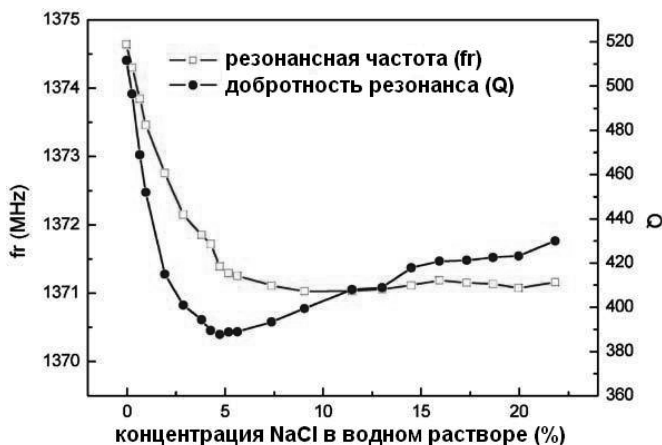


Рис. 6.4

Авторы [5] использовали ближнеполевую сканирующую СВЧ-микроскопию для контроля содержания воды в коже. Обосновывая интерес к такого рода исследованиям, они отмечали, что воздействие СВЧ-излучения на биообъекты может быть источником опасности, а может иметь и терапевтическое применение. Малая глубина проникновения ближнего СВЧ-поля в биообъект является благоприятным обстоятельством для изучения диэлектрических свойств кожи. Изменения в диэлектрической проницаемости кожи может свидетельствовать об ее клинически важных изменениях. Авторы [5] указывали на то, что сухое состояние кожи наблюдается у пациентов с заболеваниями кожи, а также у пациентов с некоторыми формами дерматита. Авторы [5] исследовали потерю влаги отдельными участками кожи пальца человека после помещения его в воду на 30 минут при 37°C в естественных условиях.

Ближнеполевой СВЧ-микроскоп включал в себя коаксиальный резонатор, центральный проводник которого имел диаметром 0,7 мм на конце (рис. 6.5).

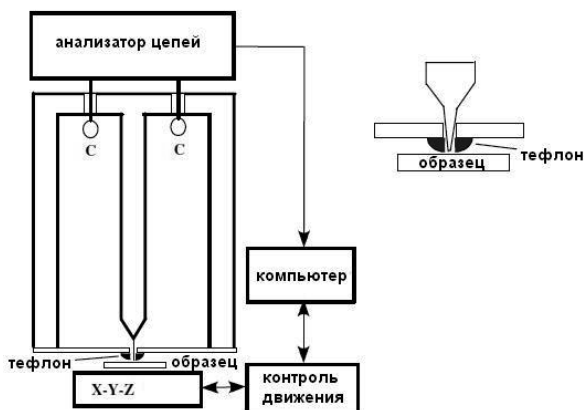


Рис. 6.5

Для контроля параметров резонатора использовался анализатор спектра. Добротность резонатора заключалась в интервале 150–200 для резонансных мод 0,92; 2,7; 4,4; 6,3; 8,2 и 10,1 ГГц. Измерения осуществлялись на среднем пальце со стороны ладони приблизительно на расстоянии 1 см от кончика пальца. Для измерений использовались также образцы кожи бедра цыпленка с неповрежденной тканью. Сканирование осуществлялось в плоскости в области площадью $\sim 1 \text{ см}^2$. Измерения проводились также и для случая, когда небольшая часть кожи была термически повреждена. Для обезвоживания образца использовалось специальное нагревательное устройство. Содержание воды гидратированного среднего пальца как функция времени иллюстрируется рис.6.6. На рисунке показано изменение насыщенности кожи водой от нормального состояния ($\sim 32\text{--}35\%$) до гидратации (~ 30 мин) после выпитывания воды, находящейся при температуре 37°C ($\sim 50\%$) и последующего его возврата к нормальному состоянию с течением времени.

На рис. 6.7 показана фотография поврежденного образца ткани кожи цыпленка. Сожженная область имела ширину $z = 3$ мм и располагалась горизонтально поперек середины образца. Рис. 6.5 и 6.6 показывают изменение частоты f и добротности Q на самой низкой 0,9 ГГц и самой высокой 10,1 ГГц частотах мод резонатора. Приве-

денные изображения показывают горизонтальные области, где осуществлялось обжигание образца. Авторы [5] отмечают, это ближнеполевая СВЧ-микроскопия может быть полезным инструментом для раннего обнаружения опухолей.

Авторы [6] показали возможность использования ближнеполевого СВЧ-микроскопа для фиксации по изменению диэлектрической проницаемости малых изменений концентрации NaCl в водном растворе.

Для этой цели обычно использовались инвазивные приборы. Предложенный авторами [6] микроскоп содержит в своем составе диэлектрический резонатор. Рабочая частота микроскопа ~ 4 ГГц. Расстояние кончик

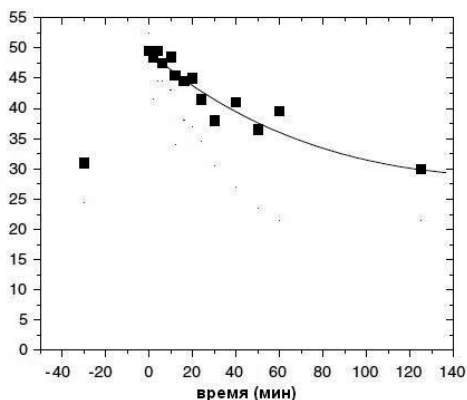


Рис. 6.6

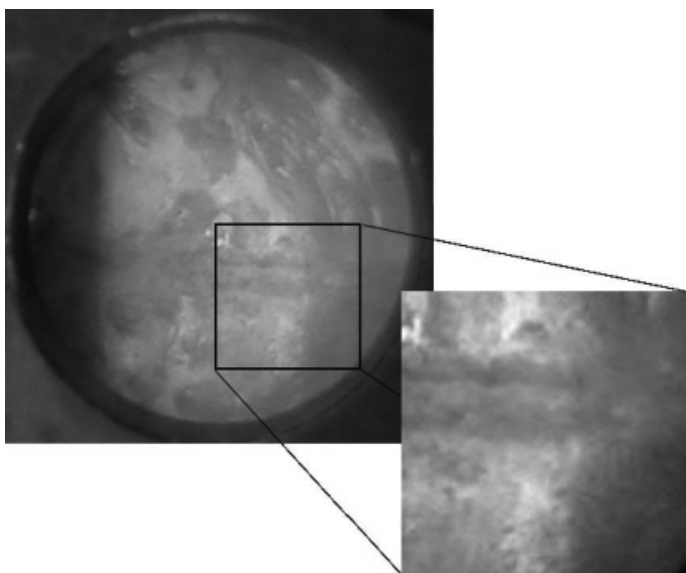


Рис. 6.7

зонда — поверхность раствора составляло ~ 1 мкм. Образцы с раствором устанавливались на платформе, которая обеспечивала перемещение образца с раствором по трем координатам. В резонаторе возбуждался TE_{011} тип колебаний, добротность резонатора составляла 24000.

На рис. 6.8 приведена зависимость коэффициента отражения от резонатора от концентрации NaCl в деионизованной воде. Максимальное значение концентрации NaCl составляло 10 мг/мл. Объем измеряемого раствора составлял 50 мкл.

Из приведенных результатов видно, что наблюдается изменение характера резонансной кривой с ростом концентрации NaCl. На вставках к рис.6.8 показан рост коэффициента отражения с ростом концентрации NaCl.

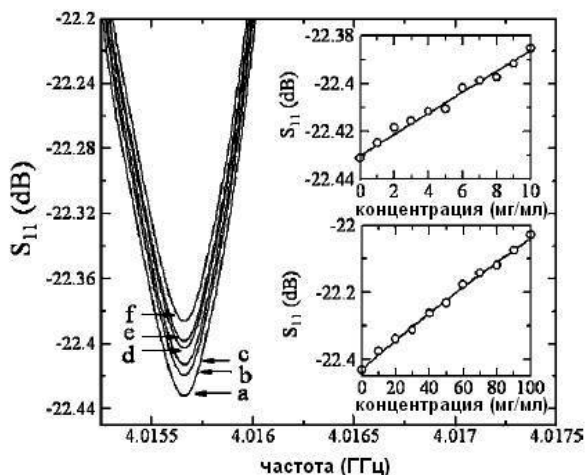


Рис. 6.8

Согласно оценке минимальное обнаруживаемое значение концентрации составляло 0,005 мг/мл. На рис.6.9 показаны зависимости коэффициента отражения от концентрации NaCl для различных значений концентрации глюкозы (*a* — концентрация глюкозы 1 мг/мл). На вставке к этому рисунку показана зависимость коэффициента отражения концентрации глюкозы при концентрации NaCl — 1 мг/мл.

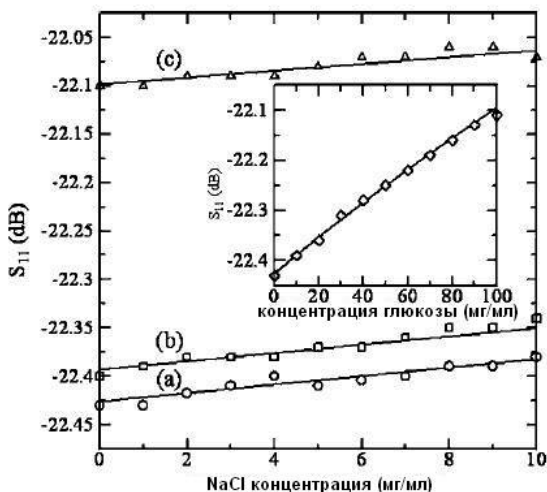


Рис. 6.9

Авторы [7] подробно описали конструкцию ближнеполевого СВЧ-микроскопа, совмещенного с атомно-силовым микроскопом, и применили созданное ими устройство для одновременного получения изображений одних и тех же нанобъектов различными способами. Это дало им возможность сравнивать полученную информацию и определить дополнительные возможности для описания характеристик объектов исследования. Общим элементом для ближнеполевого и атомно-силового микроскопов был зонд. Авторы [7] отмечают, что измерения с помощью атомно-силового микроскопа в этом случае служат своего рода обоснованием достоверности измерений с помощью ближнеполевого микроскопа. В качестве примера авторы [7] привели изображение раковых клеток груди на стеклянной подложке, одновременно полученные с помощью их устройства (рис.6.10).

Изображение, полученное с помощью атомно-силового микроскопа, показывает топографию клетки с резко выраженной структурой вблизи ее центра, показывающей окружение ядра. Использование изображений с помощью ближнеполевого микроскопа, полученных в результате детектирования амплитуды или фазы, открывает возможность анализировать различные аспекты свойств клетки, в

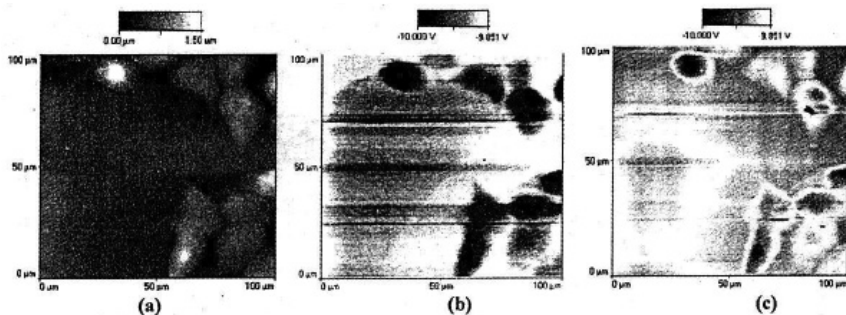


Рис. 6.10

частности, фазовое изображение выделяет мембрану клетки, амплитудное — контрастирует ее ядро.

Список литературы к главе 6

1. Резник А.Н., Юрасова Н.В. Ближнепольная СВЧ-томография биологических сред // Журн. тех. физики. 2004. Т. 74, № 4. С. 108–117.
2. Резник А.Н., Юрасова Н.В. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнепольной СВЧ-диагностики // Журн. тех. физики. 2006. Т. 76, вып. 1. С. 90–104.
3. Klein L.A., Swift C.T. An Improved Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies // IEEE Trans Ant.Propagat. 1977. V. 25, № 1. P. 104–110.
4. Park J., Hyun S., Kim A., Kim T., Char K. Observation of biological samples using a scanning microwave microscope // Ultramicroscopy. 2005. V. 102, № 2. P. 101–106.
5. Lofland S.E., Mazzatenta J.D., Croman J., Tyagi S.D. Multimode near-field microwave monitoring of free water content of skin and imaging of tissue // Phys. in Med. and Biology. 2007. V. 52, № 5. P. 1295–1301.
6. Babajanyan A., Kim J., Kim S., Lee K., Friedman B. Sodium chloride sensing by using a near-field microwave microprobe // Appl.Phys. Lett. 2006. V. 89, № 18. 183504 (3 pag.).
7. Tabib-Azar M., Wang Y. Design and Fabrication of Scanning Near-Field Microwave Probes Compatible With Atomic Force Microscopy to Image Embedded Nanostructures // IEEE Trans. MTT. 2004. V. 52, № 3. P. 971–979.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов открыло новые возможности для исследования свойств материалов и структур, в частности используемых в радиоэлектронике. По сравнению с оптическими микроскопами ближнеполевые микроскопы позволяют визуализировать структуру объекта под поверхностью. Разрешающая способность ближнеполевых СВЧ-микроскопов в пространстве координат составляет единицы нанометров, то есть соизмерима с возможностями туннельных и атомно-силовых микроскопов. Каждый из рассмотренных типов ближнеполевых СВЧ-микроскопов с зондами в виде волноводов с отверстием, в виде плоских линий передачи, коаксиальными зондами с внутренним проводником, выступающим за пределы внешнего, и другими может иметь свою область, где его применение наиболее рационально. Так как чувствительность ближнеполевых СВЧ-микроскопов во многом определяется входящим в его состав СВЧ-резонатором, то дальнейшее совершенствование его основных характеристик может быть связано с подбором наиболее чувствительного к вносимому в резонатор «возмущения» в виде измеряемого объекта. Широкому применению ближнеполевых СВЧ-микроскопов может способствовать выявление тех значимых для науки и практики объектов, где их достоинства уникальны и позволяют определять параметры, измерение которых невозможно другими методами. Именно поиск таких областей применения должен составить направление дальнейших исследований.

Научное издание

Усанов Дмитрий Александрович

**БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ СКАНИРУЮЩАЯ
СВЧ-МИКРОСКОПИЯ
И ОБЛАСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ**

Редактор *Е.А. Митенёва*

Технический редактор *Л.В. Агальцова*

Корректор

Оригинал-макет подготовила *С.В. Демченко*

Подписано в печать __. __. 20__ г. Формат 60x84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,83. Уч.-изд. л. 6,22. Тираж _____ экз. Заказ

Издательство Саратовского университета.
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

Типография Издательства Саратовского университета.
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.