

РЕЗОНАТОРНЫЙ ЗОНД БЛИЖНЕПОЛЕВОГО СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОВОЛНОВОГО МИКРОСКОПА

Гордиенко Ю. Е., Рябухин А. А., Слипченко Н. И., Ананьин В. В.
Харьковский национальный университет радиэлектроники
пр. Ленина, 14, Харьков – 61166, Украина
Тел.: +38 (057) 7021362; e-mail: ryabukhin@kture.kharkov.ua

Аннотация – Приводится описание высокочастотного резонаторного зонда ближнеполевого сканирующего микроволнового микроскопа на основе связанных объемного и коаксиального резонаторов.

I. Введение

Существующие ближнеполевые микроволновые микроскопы обеспечивают пространственную разрешающую способность порядка нескольких тысячных долей длины волны. В качестве зондов в таких микроскопах применяются: объемные резонаторы с цилиндрической апертурой, коаксиальные резонаторы и кабели, резонаторы и волноводы со щелевыми апертурами, резонансные волноводные штыри, микрополосковые резонаторы и др.

Коаксиальные зонды строятся либо на основе четвертьволнового коаксиального резонатора [1], либо отрезка коаксиального кабеля [2]. Зондирующее поле излучается с острой металлической иглы, соединенной с центральным проводником и выступающей из плоскости апертуры. По мере уменьшения радиуса иглы, увеличивается пространственное разрешение, благодаря локализации взаимодействия между иглой и образцом. Разрешающая способность микроволновой микроскопии в целом определяется размером острия иглы зонда и чувствительностью системы выделения сигналов измерительной информации [3, 4]. Теоретически увеличение разрешающей способности в такой системе можно получить, повышая рабочую частоту. Однако на практике это не может быть реализовано из-за уменьшения исходной добротности коаксиального резонатора в миллиметровом диапазоне. Перспективным направлением повышения разрешающей способности микроволновой микроскопии является создание новых видов высокочастотных резонаторных зондов.

II. Основная часть

Был разработан резонаторный зонд, работающий на частоте 35,79 ГГц, на основе связанных объемного и коаксиального резонаторов (рис.1). Объемный резонатор, работающий на E_{011} типе колебаний, состоит из двух частей в виде чашек. Отверстие в центре основания съемной чашки совместно с иглой образует отрезок коаксиальной линии, имеющей связь с объемным резонатором. Длина этого отрезка равна половине длины волны в коаксиальной линии на рабочей частоте объемного резонатора. Игла является центральным проводником коаксиальной линии и заостренным концом выступает за пределы апертуры. Заостренный конец иглы имеет вид конуса с углом при вершине 0,06 градуса, радиус острия составляет 1 – 1,5 мкм.

Отверстие в чашке, примыкающей основанием к широкой стенке волновода, совместно со штырем, расположенным по центру прямоугольного волновода параллельно его узким стенкам, предназначено для электромагнитной связи резонатора с волноводом. Путём перемещения штыря, входящего в отверстие чашки, можно регулировать степень связи резонатора с волноводом. Игла зонда изготовлена методом электрохимического травления из вольф-

рамовой проволоки диаметром 400 мкм. Фиксация зонда в отверстии резонатора производится с помощью фторопластовой втулки.



Рис. 1. Резонаторный зонд.

Fig. 1. Resonator probe

Настройка зонда заключается в установлении его оптимальной связи с СВЧ трактом, а также подгонке длины иглы и положения ее относительно объемного резонатора (длина выступающей за пределы резонатора и входящей в резонатор частей иглы). Последняя процедура требует довольно кропотливой работы и занимает много времени.

При резонансном коэффициенте передачи - 9,6 дБ и резонансной частоте 35,79 ГГц добротность зонда составила 2750.

Основными электрическими параметрами резонаторных зондов, применяемых в микроволновой микроскопии являются: резонансная частота и добротность; их изменения при взаимодействии зондирующего поля с объектом исследования; коэффициент связи резонатора с линией.

Введение образца в поле зонда приводит к одновременному изменению резонансной частоты и добротности резонатора. Регистрация этих изменений в большинстве случаев предполагает определение параметров невозмущенного и возмущенного образцом зонда. Чем меньше время перехода от одного измерения к другому, тем меньше вероятность изменения выходных сигналов, вызванного мешающими факторами (изменение параметров как самого зонда, не связанное с контролируемыми свойствами образца, так и зондирующего СВЧ сигнала, вызванных в первую очередь изменениями температуры). На момент завершения измерений с возмущенным резонатором в измерителе должны присутствовать результаты измерений невозмущенного резонатора. Существуют два основных способа фиксации параметров невозмущенного резонатора. В первом случае данные о параметрах невозмущенного резонатора сохраняются в опорном резонаторе, а при измерениях сигналы с обоих резонаторов сравниваются.

Во втором способе данные об измеренных предварительно параметрах невозмущенного резонатора оцифровываются и сохраняются в памяти. Измерители, реализующие этот способ, предлагают периодическую установку «нуля». В этом случае точность изме-

рений существенно зависит от стабильности питающего СВЧ генератора и условий контроля (температура, влажность и т.п.).

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

Наиболее точными являются способы измерения с использованием синтезатора частоты в качестве источника СВЧ сигнала. Частотная зависимость коэффициента передачи или отражения исследуемого резонатора снимается по точкам. Результаты измерений оцифровываются и передаются в компьютер, где производится математическая обработка полученных данных и расчет добротности. Точность определения резонансной частоты при этом достигает 10^{-7} – 10^{-8} , добротности порядка 0,1%. При проведении измерений температура резонатора должна поддерживаться с точностью 0,01°C. Получение такой высокой точности зачастую требует неоднократных измерений и проведения статистической обработки полученных данных.

Время измерения зависит от шага перестройки частоты; времени установления частоты после её переключения; времени, необходимого для обработки данных.

Высокое быстродействие определения параметров зонда может быть достигнуто следующим образом. Резонаторный зонд возбуждается частотно-модулированным сигналом так, что средняя частота этого сигнала совпадает или мало отличается от резонансной частоты. Частота модуляции значительно ниже частоты СВЧ сигнала, девиация частоты СВЧ сигнала порядка полосы резонатора по уровню половинной мощности. Изменение добротности и резонансной частоты приводит к изменению спектра НЧ сигнала на выходе СВЧ детектора, на вход которого поступает мощность, прошедшая или отраженная от зонда. Спектр этого сигнала содержит комбинационные составляющие частоты модуляции F . В основном ограничиваются определением амплитуды составляющих F и $2F$. Установление связи между изменением составляющих спектра и изменением параметров зонда требует проведения обратных преобразований Фурье. Точность измерений в данном случае зависит от стабильности средней частоты сигнала и величины девиации, а также отклонениями закона модуляции от гармонического.

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

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

III. Заключение

На основе описанного резонаторного зонда был создан макетный образец ближнеполевого сканирующего микроволнового микроскопа для локальной безэлектродной микродиагностики физико-механических, электрических и фотоэлектрических свойств материалов, включая полупроводники, диэлектрики, проводники и сверхпроводники, а также микрослоистые структуры на их основе.

IV. Список литературы

- [1] S. Hong, J. Kim, K. Lee, J. T. Kim, D. Cha, Y. Lee. Tunable resonance cavity control in a near-field scanning microwave microscope. Journal of the Korean physical society. 2002. Vol. 40, No. 5. P. 861-865.
- [2] S. M. Anlage, D. E. Steinhauer, C. P. Vlahacos, B. J. Feenstra, A. S. Thanawalla, W. Hu, S. K. Dutta, F. C. Wellstood. Superconducting material diagnostics using a scanning near-field microwave microscope. IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. Vol. 9. P. 4127-4132.
- [3] Гордиенко Ю. Е. Ближнеполевая сканирующая сверхвысокочастотная микродиагностика объектов в технологии электроники. Наук. вісн. Інституту економіки та нових технологій "Нові технології", 2002, №1, 3-6
- [4] Рябухин А. А., Фурдыло А. Ф. Сканирующий микроволновый микроскоп модуляционного типа. Сб. научн. трудов 9-й Междун. конференции "Теория и техника передачи, приема и обработки информации", Харьков, 2003, с.157-158.

RESONATOR PROBE FOR NEAR-FIELD SCANNING MICROWAVE MICROSCOPE

Gordienko Yu. Ye, Ryabukhin A. A.,
Slipchenko N. I., Ananyin V. V.
Kharkov national university of radioelectronics
Lenin av., 14, Kharkov – 61166, Ukraine
Ph.: +38 (057) 7021362
e-mail: ryabukhin@kture.kharkov.ua

Abstract – Resonator probe, operating at 35,7 GHz and based on the connected cavity and coaxial resonators, has been developed. Sample insertion in a field of the probe results in simultaneous change of resonance frequency and Q-factor of the resonator that allows to determine characteristics of the sample analyzed.

On the basis of described resonator probe the model prototype of a near-field scanning microwave microscope for local contactless micro-diagnostics of physicomechanical, electric and photo-electric properties of substances, including semiconductors, dielectric materials, conductors and superconducting materials, and also sandwich structures on their basis has been created.