

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРА ЗОНД-ОБРАЗЕЦ НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАТОРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Бондаренко И.Н., Галич А.В., Троицкий С.И.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Харьков, пр. Ленина, 14, 61166, Украина
тел.: (057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

Experimental study of the effect of the gap tip-sample on the output characteristics of the resonator transducer with coaxial probe for metal, semiconductor and dielectric samples are carried out. Obtained relations allow to choose the value of working distances between the probe tip and the samples when using these transducers in scanning microwave microscopy.

Введение. Резонаторные измерительные преобразователи (РИП) активно используются в микроволновой диагностике материалов и сред. В ближнеполевой сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) РИП включает в себя резонаторную высокодобротную часть с элементами связи и соединенную с ней зондовую (микрозондовую) структуру, которая непосредственно обеспечивает взаимодействие РИП с поверхностными слоями объектов диагностики и исследования [1, 2]. Чаще всего зондовая структура представляет собой отрезок коаксиальной линии, один конец которого связан с резонаторной частью РИП, а другой заканчивается разомкнутым коаксиалом с заостренным центральным проводником. Вариацией геометрических размеров и формы этой части коаксиальной линии задается распределение электромагнитных полей, необходимое для эффективного взаимодействия с исследуемым объектом [3, 4]. Вариации характеристик исследуемых материалов ведут к изменению распределения полей и, соответственно, таких параметров РИП, как резонансная частота, добротность и амплитуда выходного сигнала. Последующая обработка и анализ изменений этих параметров дает информацию о рельефе поверхности и электрофизических характеристиках.

Однако амплитуда и распределение полей, формируемых зондовой структурой РИП при взаимодействии с образцом, будут существенным образом зависеть от величины зазора зонд-образец, а это, в свою очередь, будет влиять на эффективность работы РИП и системы СММ в целом.

В работе [5] численными методами исследовано влияние зазора зонд-образец на амплитуду, распределение полей в зазоре и характеристики РИП с коаксиальным микрозондом для величин зазоров 0...10 мкм. Показано, что с ростом зазора падает чувствительность РИП (зависимости значений частоты и добротности от параметров образца при зазорах свыше 3 мкм существенно ослабляются). В связи с этим рекомендуется рабочий зазор в СММ не более 1 мкм.

Для выявления особенностей функционирования РИП с излучающими коаксиальными зондовыми структурами представляется интересным изучение влияния на характеристики РИП зазоров как значительно меньших, так и сравнимых с рабочей длиной волны.

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния зазора на выходные характеристики РИП.

Основная часть. Особенности исследуемой структуры (резонатор + коаксиальный зонд) заключаются в том, что для неё нельзя использовать методики исследования излучающих элементов типа электрических и магнитных диполей поскольку, во-первых, измерения проводятся в ближней зоне, во-вторых, в этой зоне к тому же расположен образец, и, наконец, в третьих, зонд непосредственно соединен с резонатором, изменения параметров которого и являются основными информационными сигналами.

С учетом отмеченных особенностей изучение влияния зазора на выходные характеристики РИП производилось с помощью экспериментальной установки, которая представляла собой измерительный преобразователь на основе проходного объемного

резонатора с коаксиальной зондовой структурой, к входу которого через развязывающее устройство (ферритовый вентиль) подсоединен перестраиваемый измерительный СВЧ генератор трехсантиметрового диапазона, а выход, также через развязывающие устройства, – к частотомеру и детекторной секции. Сигнал с выхода детекторной секции подавался на вход осциллографа. Образцы размещались перед коаксиальным зондом. В качестве образцов использовались пластины меди, кремния ($d = 4$ мм, $\rho = 0,06$ Ом·см, $\epsilon \sim 12$) и полистирола ($d = 6$ мм, $\epsilon \sim 2,5$, $\text{tg}\delta \sim 4 \cdot 10^{-4}$).

Графики полученных экспериментально зависимостей величины выходного сигнала, резонансной частоты и добротности РИП от величины зазора приведены на рис. 1, 2 и 3.

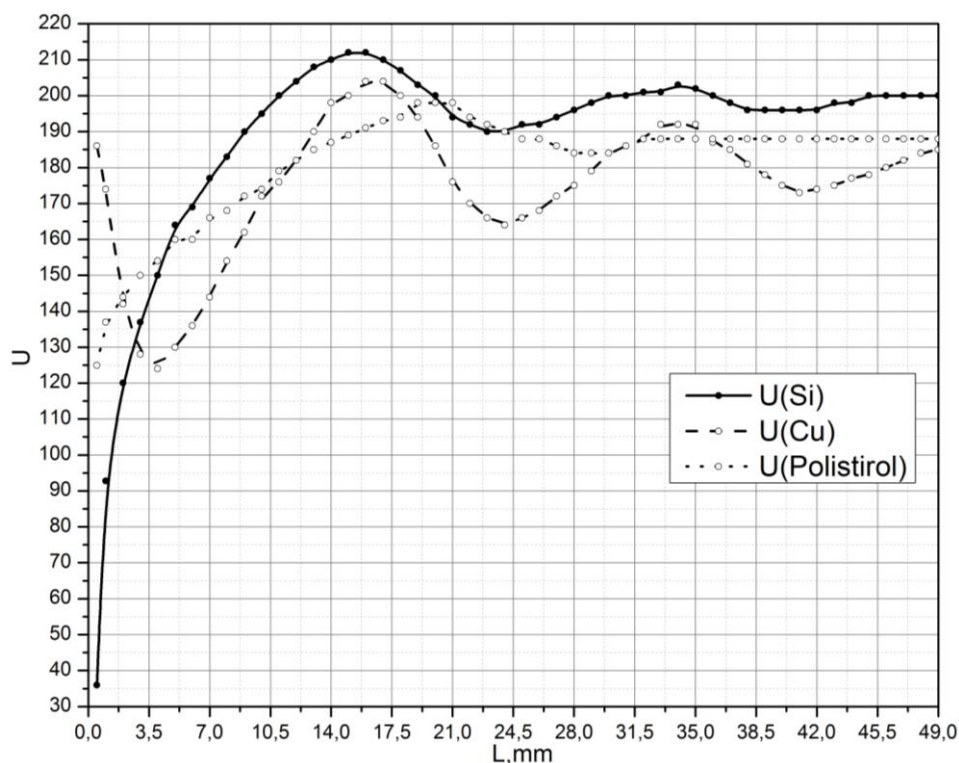


Рис. 1. Зависимости выходного сигнала РИП от величины зазора

Сразу следует отметить, что графики построены по данным нескольких циклов измерений, поэтому вероятность появления случайных значений невысока.

Анализ графиков рис. 1 и 2 приводит к выводу о наличии, по крайней мере, двух областей, отличающихся характером формирования и распределения полей, соответствующим величинам зазоров от 0 до 1 мм и более 1 мм.

В области зазоров более 1 мм наблюдается волновой характер формирования полей, что подтверждается явными интерференционными эффектами, наблюдаемыми на графике рис. 1 для медного образца. На графиках рис. 1 для кремния и полистирола также наблюдаются эти эффекты, однако они несколько смазаны вследствие частичного прохождения электромагнитной волны через образцы и наличия волн, отраженных от задних поверхностей этих образцов. Дополнительным подтверждением этого является наличие минимума выходного сигнала (рис. 1) и значения добротности (рис. 3) для полупроводникового образца при его максимальном приближении к зонду. Это может быть обусловлено тем, что на толщине полупроводникового образца ($d = 4$ мм) при $\epsilon = 12$ в нем укладывается четверть рабочей длины волны и, соответственно, волна, отраженная от задней кромки полупроводникового образца оказывается в противофазе с волной, излучаемой зондовой структурой.

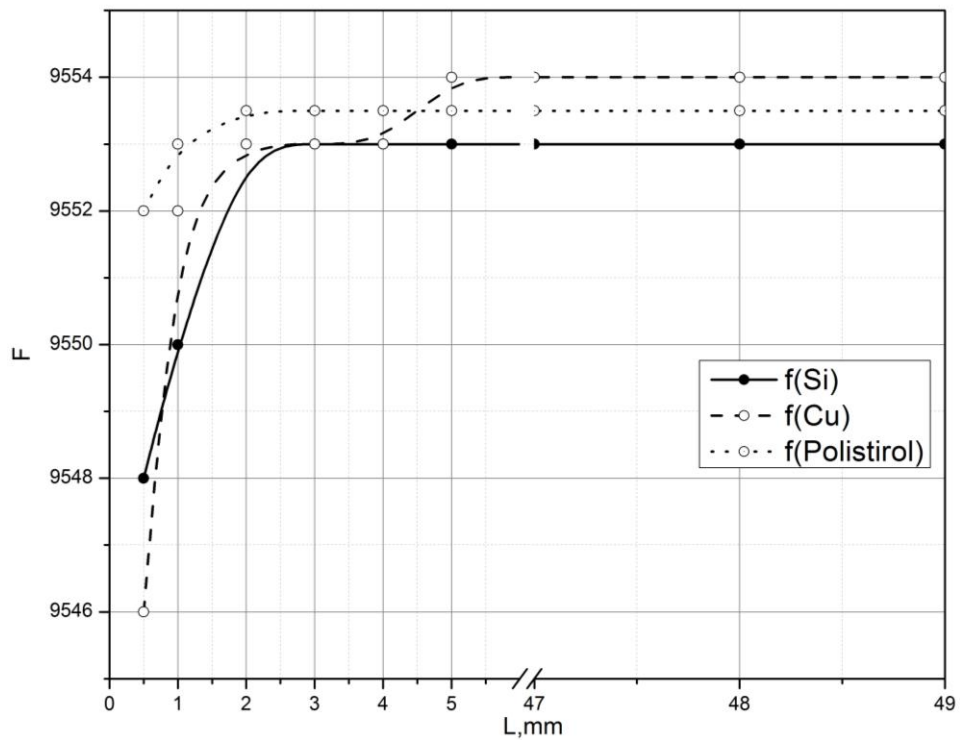


Рис. 2. Зависимость резонансной частоты РИП от величины зазора

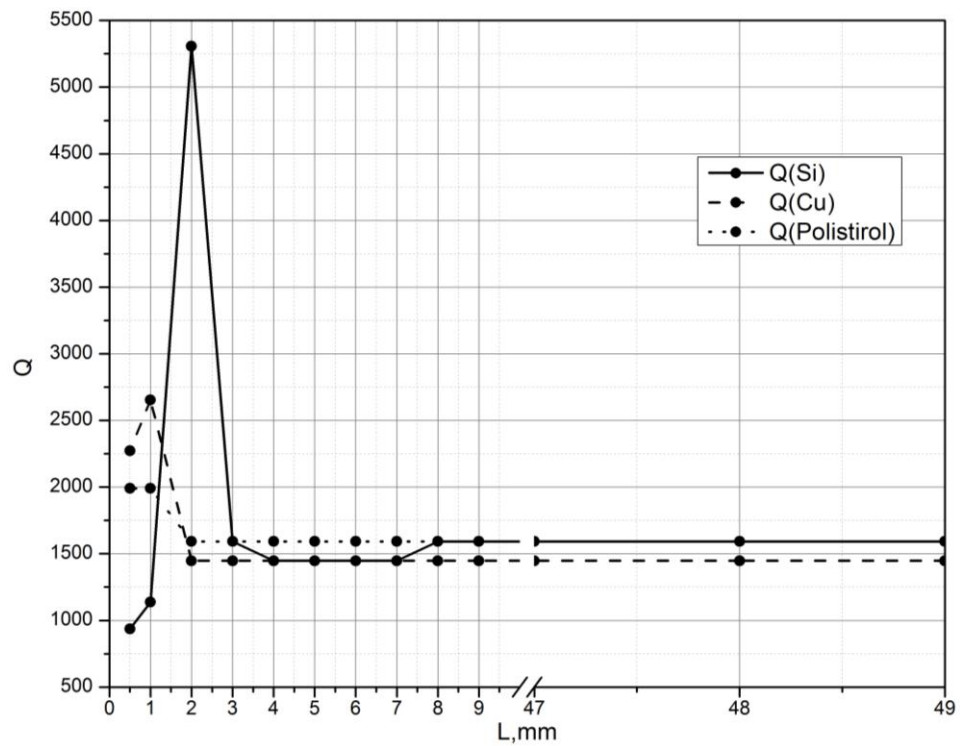


Рис. 3. Зависимость добротности РИП от величины зазора

Можно отметить также, что в областях зазоров более 3 мм начинают преобладать потери излучения и устанавливаются практически неизменные значения резонансной частоты (рис. 2) и добротности (рис. 3), а влияние характеристик образцов несущественно.

Характер изменения выходных параметров РИП в области зазоров меньше и порядка 1 мм показывает их сильную зависимость от величины зазора и материала образца. Эти результаты коррелируют с данными, полученными в работе [5], правда, для значительно меньших величин зазоров.

В тоже время для зависимостей добротности РИП от величины зазора в случае медного проводника и полупроводника наблюдается максимумы значений добротности при зазорах 1 и 3 мм, соответственно (рис. 3). Можно предположить, что в области этих значений зазоров потери, вносимые в РИП при диагностике использованных образцов, минимальны и, соответственно, его чувствительность в таких условиях невысока, хотя влияние реактивной составляющей внешнего поля, по крайней мере, для медного образца, остается заметным (см. рис. 2).

На следующем этапе работы предполагается провести экспериментальные исследования в области зазоров, равных единицам и десяткам микрометров и с большим набором образцов, для более детального выявления особенностей взаимодействия РИП и образцов различных материалов.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования влияния зазора зонд-образец на выходные характеристики РИП с коаксиальным зондом показали наличие двух различных областей значений зазоров, в которых характер изменений выходных характеристик РИП существенно отличается. При этом в качестве рабочей области для применения РИП с зондовой структурой в СММ можно считать область зазоров менее 1 мм. В тоже время, полученные экспериментальные результаты требуют дополнительной теоретической проработки характера происходящих процессов и проведения более детальных экспериментальных исследований в области зазоров в единицы миллиметров и микронного размера для большего набора материалов.

Список литературы

1. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P. et al. Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization. John Wiley & Sons, Ltd., 2004. - 537p.
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 / edited by S.V.Kalinin, A.Gruverman. – New York: Springer-Verlag, 2007. – Vol. 1. – pp. 215-253.
3. Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю., Яцкив А.М. Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2009. – № 159. – С. 309–314.
4. Gordienko, Yu.E., Larkin, S.Yu., and Prokaza, A.M. Electromagnetic Properties of Resonator Microprobe for the Scanning Microwave Microscopy / Telecommunications and Radio Engineering – 2011, Vol. 70, No15, pp.1333-1342.
5. Gordienko Yu.E., Larkin S.Yu., and Prokaza A.M. Quantitative Estimation of Physical Processes at a Contactless Scanning Microwave Microscopy / Telecommunications and Radio Engineering – 2012, Vol. 71, No 3, pp. 265 – 276.