

УДК 621.317.729.2

## МОДЕЛИ ЗОНДОВ ДЛЯ БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Т.П. БОЛОТЬКО

Белорусский государственный университет  
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: tim08.bol.08@gmail.com

**Аннотация.** Разработаны и численно исследованы модели пассивных зондов для систем ближнеполевой микроскопии. Модели базируются на методе конечных интегралов. Рассмотрены физические основы работы зондов, а также их конструкционные особенности. Приведены результаты моделирования системы зонд – неоднородность.

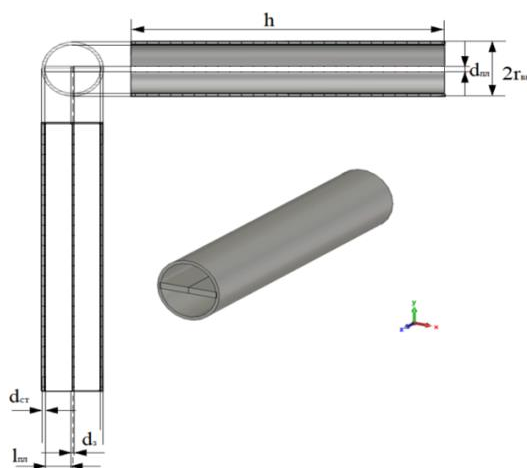
**Abstract.** Models of passive probes for near-field microscopy systems have been developed and numerically analyzed. The models are based on the finite integral method. The physical principles of probe operation and their design features are discussed. Simulation results for the probe-inhomogeneity system are presented.

### Введение

Зондовая микроскопия играет важную роль в задачах диагностики конструкционных и материальных параметров поверхностей [1, 2, 3, 4]. Известны различные типы зондов и технологии их использования. Ближнеполевая микроскопия является одним из перспективных направлений диагностики материалов и покрытий. Большинство известных подходов используют оптический и инфракрасный диапазоны. Излучение СВЧ-диапазона обладает, однако актуальной проблемой является разрешающая способность, зависящая от конструкции зондов и схемы измерений. Поэтому разработка СВЧ-зондов пассивного типа, обладающих высокой пространственной разрешающей способностью, является важной и актуальной задачей.

### Модель зонда с пассивным возбуждением

Рассмотрим модель зонда, состоящую из металлической трубки и двух прямоугольных металлических вставок (рисунок 1).



**Рис. 1.** Модель зонда. Параметры зонда:  $h = 20$  мм,  $r_{вн} = 3,6$  мм,  $d_{ст} = 0,1$  мм,  $d_3 = 0,05$  мм,  $d_{пл} = 0,5$  мм,  $l_{пл} = 3,5$  мм

Зонд возбуждается плоской линейно поляризованной электромагнитной волной, которая распространяется перпендикулярно его оси. Вектор напряжённости электрического поля параллелен оси зонда. Зонд расположен в свободном пространстве. Результаты численного моделирования взаимодействия волны с зондом представлены на рисунке 2 в виде частотной зависимости эффективной поверхности рассеяния в направлении на источник волны.

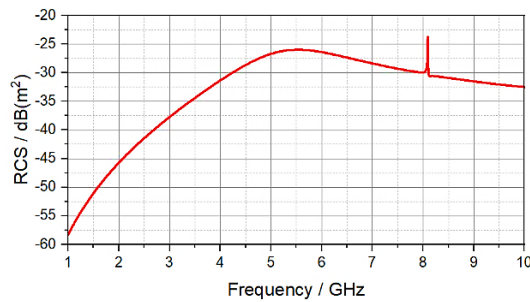


Рис. 2. Частотная характеристика рассеяния излучения на зонде

На рисунке 2 наблюдается высокочастотный резонанс, обусловленный интерференцией электромагнитного поля, возбуждаемого токами на внешнем цилиндре и полем, излучаемым узкой щелью в торце зонда, образованного металлическими пластинами. Физически этот эффект соответствует Фано-резонансу [5, 6]. Положение Фано-резонанса зависит от наличия неоднородности в ближней зоне щели зонда, что иллюстрирует рисунок 3.

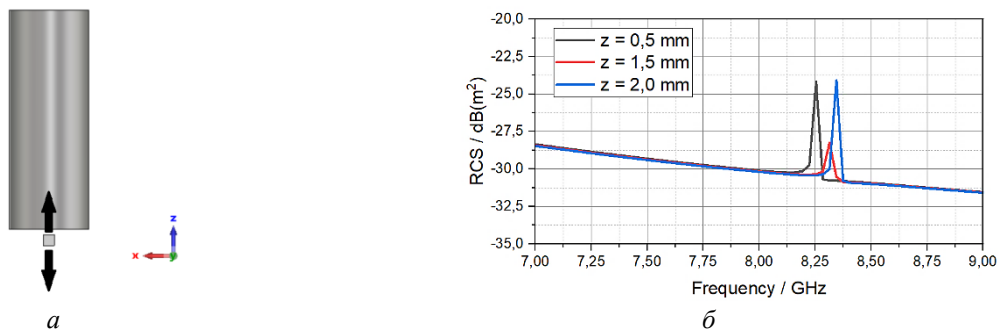


Рис. 3. Зависимость частоты резонанса Фано от расстояния до апертуры зонда (а) и схема эксперимента

На рисунке 3 а) показан зонд с неоднородностью в виде металлической частицы кубической формы и размера 1 мм, перемещаемой вдоль оси зонда. На рисунке 3 б) показано смещение Фано-резонанса при изменении расстояния между частицей и щелевой апертурой зонда.

### Модель зонда с несимметричной металлической перегородкой

Наличие неоднородности в ближней зоне щелевой апертуры зонда приводит к смещению резонанса. Если разместить металлический диск ортогонально оси зонда с небольшим смещением от середины зонда, мы получаем возможность наблюдать два резонанса, поскольку внутри зонда будут сформированы два резонатора с различающимися резонансными частотами (рисунок 4).

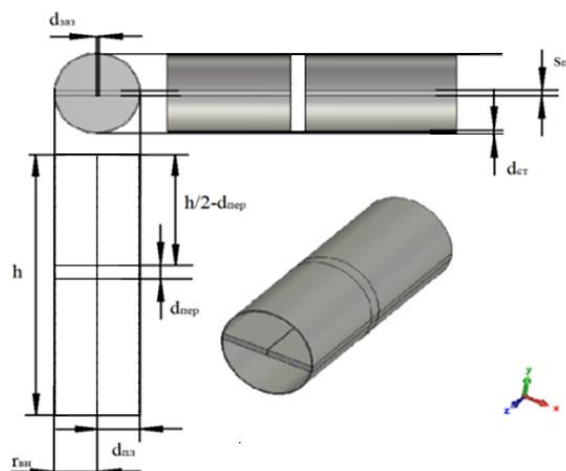
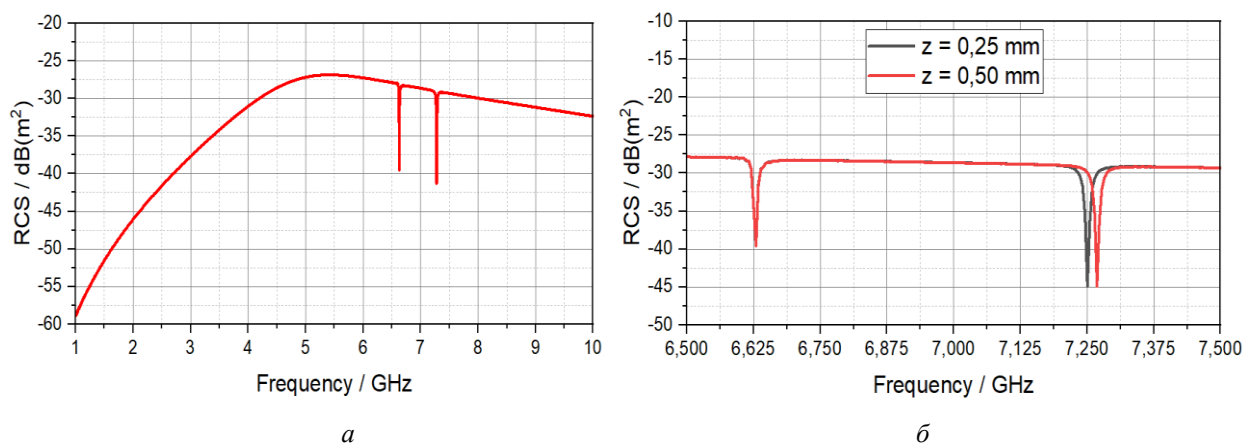


Рис. 4. Модель четвертьволнового зонда с пассивным возбуждением зонда. Параметры зонда:  $h = 20$  мм,  $r_{\text{внеш}} = 3,6$  мм,  $d_{\text{ст}} = 0,1$  мм,  $d_{\text{зазора}} = 0,01$  мм,  $d_{\text{пер}} = 1$  мм,  $d_{\text{пл}} = 1$  мм,  $l_{\text{пл}} = 3,5$  мм.

При возбуждении зонда с несимметричным смещением поперечного диска в спектре рассеянного поля будет наблюдаться два резонанса, как показано на рисунке 5 (а).

При размещении указанная выше неоднородность на разных расстояниях от раскрыва зонда с его одной стороны получаем частотные зависимости эффективной поверхности рассеяния, представленные на рисунке 5 (б).



**Рис.5.** Частотная характеристика рассеяния излучения на зонде (а) и частотный отклик на изменения положения объекта (б)

Анализ результатов показывает, что положение резонанса соответствующего части зонда без неоднородностей не меняется, а для другой части зонда с частицей наблюдается частотный сдвиг резонанса. Поэтому, схема зонда с несимметричной вставкой обеспечивает дополнительно формирование опорной частоты, относительно которой измеряется частотный сдвиг, обусловленный наличием неоднородности.

Таким образом, рассмотренная выше модель зонда может быть использована в технологиях ближнеполевой микроскопии. Чувствительностью зонда можно управлять за счёт размеров целевой апертуры, образованной металлическими пластинами.

### Заключение

Разработаны вычислительные модели зондов в виде полых металлических трубок с продольными металлическими пластинами для систем ближнеполевой микроскопии. Численное моделирование зондов базируется на методе конечных интегралов. Приведены результаты моделирования систем зонд-неоднородность. Дано физическое обоснование работоспособности.

### Список использованных источников

1. Rosner, B. T. High-frequency near-field microscopy / B. T. Rosner and D.W. van der Weide // Rev. Sci. Instrum. — 2002. — V. 73. — № 7. — P. 2505 – 2525.
2. Vlahacos C.P., Black R.C., Anlage S.M., Amar, A., Wellstood, F.C. (1996). Near-field scanning microwave microscope with 100  $\mu\text{m}$  resolution. Applied Physics Letters. 69. 3272 - 3274. 10.1063/1.118033.
3. Reznik, A. N. Electromagnetic model for near-field microwave microscope with atomic resolution: Determination of tunnel junction impedance / A. N. Reznik // Appl. Phys. Lett. – 2014. – V. 105. – № 8. – P. 083512.
4. Reznik, A. N. Quasistatics and electrodinamics of near-eld microwave microscope / A. N. Reznik // J. Appl. Phys. – 2014. – V. 115. – № 8. – P. 084501.
5. Zhan J, Jehle T, Stephan S, Tiguntseva E, Nochowitzz SS, Groß P, Duan J, Makarov S, Lienau C. Interferometric Near-field Fano Spectroscopy of Single Halide Perovskite Nanoparticles. Nano Lett. 2024 Dec 11;24(49):15738-15744. doi: 10.1021/acs.nanolett.4c04491. Epub 2024 Nov 28. PMID: 39609946; PMCID: PMC11638946.
6. Luk'yanchuk, B., Zheludev, N. I., Maier, S. A., Halas, N. J., Nordlander, P., Giessen, H., & Chong, C. T. (2010). "The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials". Nature Materials, 9(9), 707–715.