

Ближнеполевой СВЧ микроскоп для измерения проводимости тонких металлических пленок

В. И. Фролов^{1,*}, В. А. Вдовин^{2,†}, В. Г. Андреев^{3‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт Радиотехники и Электроники имени В. А. Котельникова РАН Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Описан экспериментальный прототип ближнеполевого микроскопа на базе коаксиального СВЧ резонатора и векторного анализатора цепей R&S ZVA 24. Приведены результаты тестовых измерений сдвига резонансной частоты и добротности резонансной кривой с использованием объемных проводников, изготовленных из металлов с различной проводимостью. Показано качественно, что резонансная частота и добротность уменьшаются при приближении зонда к поверхности проводника. Значение добротности минимально при использовании проводника с наименьшей проводимостью.

PACS: 73.61.-g

УДК: 531.86, 621.317.

Ключевые слова: ближнеполевая микроскопия, электрическая проводимость, нанометровые металлические пленки.

ВВЕДЕНИЕ

Особые электрофизические свойства нанометровых металлических пленок были известны давно. Эти свойства проявляются наиболее заметно при толщине пленки, много меньшей толщины скин-слоя падающего излучения [1, 2]. В этом случае возникает класс размерных эффектов, проявляющийся в аномально большом поглощении электромагнитного излучения. Наибольшее количество исследований особенностей взаимодействия тонких пленок с электромагнитным излучением выполнено в видимом и ближнем ИК диапазонах [2–4]. В частности, в [2] было экспериментально зарегистрировано наличие аномально большого поглощения видимого излучения в тонких пленках металлов нанометровой толщины и отмечена роль наноструктур в металлических пленках на ход зависимости поглощения от толщины. Коэффициенты отражения, прохождения и поглощения волн на частоте 37.5 ГГц для алюминиевых нанометровых пленок на кварцевой подложке были исследованы в работе [5]. Обнаруженный эффект аномально большого (до 60%) поглощения электромагнитного излучения авторы предложили использовать для регистрации СВЧ импульсов наносекундной длительности.

Большинство СВЧ методов измерения параметров материалов и структур дают возможность получить результат измерений, усредненный по размеру, сравнимому с длиной волны излучения. При использовании та-

ких методов пространственное разрешение изменения характеристик материалов ограничивается несколькими миллиметрами. Следствием такого усреднения является то, что на результат измерения существенно влияет изменение параметров в сравнительно малой части исследуемого объекта. От такого рода ограничений свободны микроскопы, работающие на эффекте ближнего поля.

Ближнеполевая СВЧ-микроскопия — это неразрушающий прямой метод исследования, позволяющий с высокой степенью локальности получать информацию о поверхностных и подповерхностных свойствах различных сред. Данная возможность возникает за счет использования эффектов «ближнего поля», обусловленных образованием квазистационарных полей, быстро затухающих с расстоянием и локализующихся в области, малой по сравнению с длиной волны, распространяющейся в электродинамической системе. Располагая исследуемый объект в области существования этого поля, можно исследовать распределение его электрофизических свойств с разрешением, намного меньшим, чем длина волны используемого излучения [6, 7]. Пространственное разрешение в такого рода микроскопах определяется размером острия зонда.

Целью работы является создание ближнеполевого СВЧ микроскопа с пространственным разрешением порядка нескольких нм и измерение распределения электрической проводимости тонких металлических пленок на диэлектрической подложке.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ БЛИЖНЕПОЛЕВОГО МИКРОСКОПА

Будет рассмотрена конструкция ближнеполевого микроскопа (БПМ), который планируется применять

*E-mail: vlad-20-11-94@ya.ru

†E-mail: vdv@cplire.ru

‡E-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru

в дальнейших исследованиях. Основной частью БПМ является четвертьволновый СВЧ резонатор, через центральную часть которого проходит проводник. Один конец проводника закреплен на торцевом фланце, другой конец имеет форму иглы, которая выступает наружу из отверстия на противоположном фланце. Резонатор возбуждается магнитной петлей связи, ориентация которой подбирается так, чтобы обеспечить достаточный уровень возбуждения. Напряжение СВЧ подается с векторного анализатора, и он же регистрирует изменение нагрузки с изменением частоты. Объект исследования закрепляется на координатном устройстве, позволяющем перемещать объект с микронной точностью. Это принципиально важный элемент микроскопа, т. к. расстояние между поверхностью объекта (проводящей пленки) и острием зонда составляет порядка 100–200 нм и должно поддерживаться с высокой точностью в процессе сканирования. Резонансную частоту четвертьволнового резонатора цилиндрической формы с внутренним радиусом R_2 и центральным проводником R_1 можно вычислить по формуле:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi l\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{2\pi l}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \text{ пФ/м}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — электрическая и магнитная константы соответственно, l — высота резонатора, эффективные индуктивность и емкость резонатора, c — скорость света в вакууме. Для высоты резонатора можно получить простую эмпирическую формулу

$$l[\text{мм}] = \frac{47.6}{f_r[\text{ГГц}]}. \quad (2)$$

Резонансная частота не зависит от соотношения радиусов при условии отсутствия высших типов волн: $\pi(R_1 + R_2) < \lambda_0$, где λ_0 — длина волны на резонансной частоте в свободном пространстве

Взаимодействие резонатора с объектом измерения осуществляется с помощью зонда. На острие зонда локализуется область высокой напряженности поля. При приближении острия к проводящей поверхности происходит сдвиг резонансной частоты и уменьшается добротность резонатора вследствие увеличения потерь через зонд. Эквивалентные параметры для описания взаимодействия зонда с образцом показаны на рис. 1. Емкость C_1 определяется взаимным расположением и геометрией зонда и образца. Емкость C_{out} образована поверхностями фланца резонатора и образца. Всегда $C_{out} \gg C_1$, поэтому наличием C_{out} на сверхвысоких частотах можно пренебречь. Емкость C_1 включена параллельно емкости резонатора C , поэтому увеличение C_1 приводит к уменьшению частоты резонатора. Омические потери в образце определяются эффективным сопротивлением R_m . В качестве исходных данных при использовании БПМ являются резонансная частота

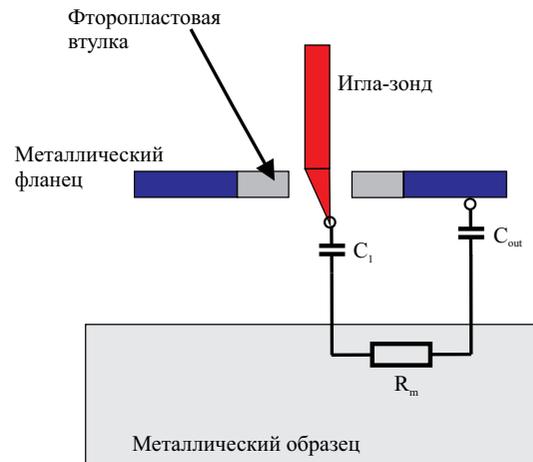


Рис. 1: Эквивалентные параметры для описания взаимодействия зонда с образцом

та и добротность, измеренные при различных расстояниях от поверхности образца. По этим данным путем решения обратной задачи восстанавливается значение комплексной проводимости.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предварительные измерения и отработка методики проведена с использованием резонатора, имеющегося в практикуме кафедры фотоники и физики микроволн. Резонатор выполнен в виде полого латунного цилиндра с внутренним диаметром 60 мм и высотой 40 мм. Конструкция была модифицирована путем замены сплошного фланца на фланец с отверстием, куда была вставлена фторопластовая втулка (рис. 1). По центру резонатора была вставлена металлическая игла от медицинского шприца диаметром 2 мм, заостренный конец которой выходил наружу через фторопластовую втулку. Вид резонатора представлен на рис. 2. Виден торец с выходящим наружу зондом — иглой.

Измерения проводились с использованием трех плоских образцов, изготовленных из алюминия, латуни и стали. Значения удельной электропроводности σ были взяты из таблиц: алюминий — 38 МСм/м, латунь — 16.24 МСм/м, сталь — 7.69 МСм/м. Образцы подносились к зонду на фиксированное расстояние x и измерялась резонансная частота f_r и ширина резонансной кривой по уровню -3 дБ ($\Delta f_{3\text{дБ}}$). Затем вычислялась добротность $Q = \frac{f_r}{\Delta f_{3\text{дБ}}}$. Линия выбиралась достаточно произвольно, важно, чтобы чувствительность была достаточной для проведения таких тестовых измерений. Измерения проведены на расстояниях $x = 0.1, 1$ и 3 мм.

Результаты измерений представлены на рис. 3. Сравнение проводилось с резонансными кривыми, полученными в отсутствие образцов ($f_0 = 3.8550 \text{ ГГц}$,

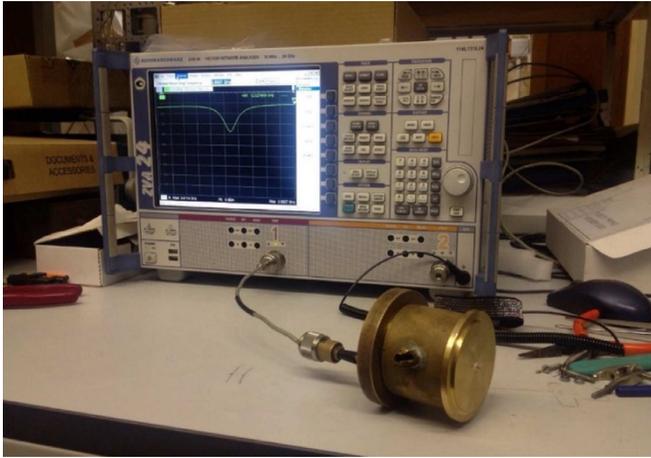


Рис. 2: Фото резонатора, подключенного к векторному анализатору

$Q_0 = 468$). Добротность резонатора в воздухе мала по сравнению с литературными данными [7, 8], где типичные значения составляют 2000, что объяснимо неоптимальным режимом работы резонатора в качестве БМП. При приближении проводящих образцов резонансная частота уменьшалась, что связано с ростом емкости C_1 (рис. 1). Добротность резонатора падала с приближением зонда к проводящей поверхности, причем наименьшая добротность наблюдалась в случае стали, где проводимость мала, и омические потери увеличены (рис. 3в).

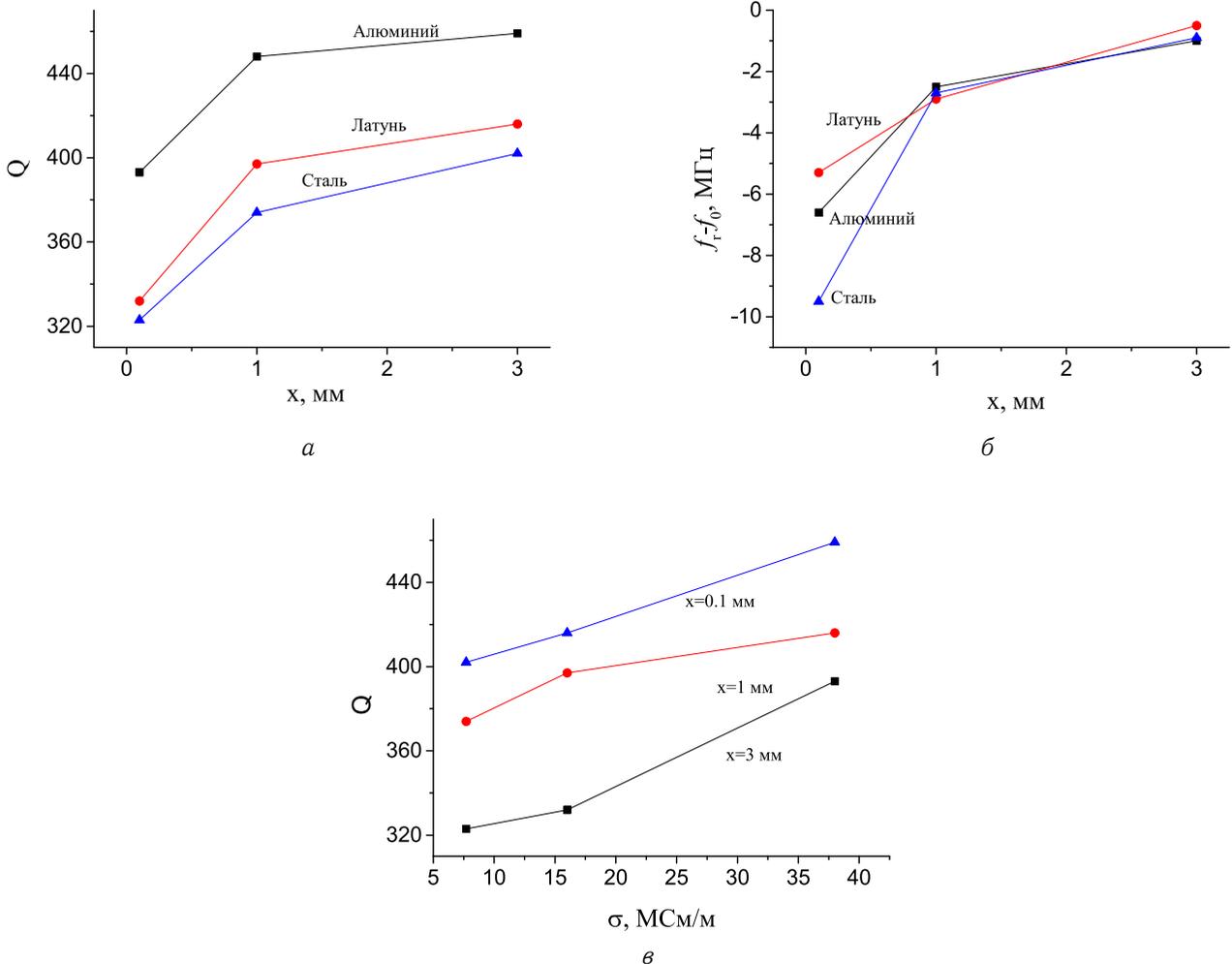


Рис. 3: Изменение резонансной частоты (а) и добротности (б) в зависимости от расстояния между зондом и образцом. Зависимость добротности от проводимости образца (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Собрана установка с прототипом ближнеполевого микроскопа на базе модифицированного резонатора, имеющегося в практикуме. Проведены тестовые измерения сдвига резонансной частоты и добротности резонансной кривой с использованием объемных проводников, изготовленных из металлов с различной проводимостью. Проведен расчет геометрии четвертьволно-

вого резонатора для измерений проводимости пленок на частоте 3 ГГц. Сделаны оценки эффективных параметров такого резонатора. Показано качественно, что резонансная частота и добротность уменьшаются при приближении зонда к поверхности проводника. При этом значение добротности минимально при использовании проводника с наименьшей проводимостью.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-07-01246 и № 16-29-09581.

- [1] *Reuter G. E. H., Sondheimer E. H.* Proc. Roy. Soc. A. **195**, № 1042. P. 336. (1948).
 [2] *Sennett R. S., Scott G. D.* JOS. **40**. P. 203. (1950).
 [3] *Henning P. F.* et. al. Phys. Rev. Lett. **83**, N 83. P. 4880. (1999).
 [4] *Arndt D. P.* et. al. Applied optics. **23**, N 20, P. 3571. (1984).
 [5] *Андреев В. Г., Вдовин В. А., Воронов П. С.* Письма

- в ЖТФ. **29**. С. 68. (2003).
 [6] *Wu Z.* et. al. AIP Advances. N 4. P. 047114. (2014).
 [7] *Reznik A. N., Demidov E. V.* Journal of Applied Physics. **113**. P. 094501. (2013).
 [8] *Imtiaz Atif* et. al. Applied Physics Letters. **90**. P. 243105. (2007).

Nearfield microwave microscope for measuring the conductivity of thin metallic films

V. I. Frolov^{1,a}, V. A. Vdovin^{2,b}, V. G. Andreev^{3,c}

¹*Department of photonics and microwave physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Mokhovaya ul. 11, str. 7, Moscow, 125009 Russia*

³*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*
E-mail: ^avlad-20-11-94@ya.ru, ^bvdv@cplire.ru, ^candreev@acs366.phys.msu.ru

An experimental prototype of the near-field microscope based on the coaxial microwave resonator and a vector network analyzer R&S ZVA 24 is described. The results of test measurements of the shift of the resonance frequency and the quality factor of the resonance curve with the use of bulk conductors made of metals of different conductivity are presented. It is shown qualitatively that the resonant frequency and the quality factor decreases as the probe approaches the surface of the conductor. Q -value is minimal when using a conductor with the lowest conductivity.

PACS: 73.61.-r

Keywords: nearfield microscopy, electrical conductivity, nanometer metallic films.

Сведения об авторах

1. Фролов Владислав Игоревич — студент; e-mail: vlad-20-11-94@ya.ru.
2. Вдовин Владимир Александрович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: vdv@cplire.ru.
3. Андреев Валерий Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 9392952, e-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru.