

## Низкоразмерный резонатор для ближнеполевого СВЧ-микроскопа

Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
410012, Российская Федерация, г. Саратов  
ул. Астраханская, 83

Теоретически и экспериментально исследовано распределение поля в резонаторе типа «металлический штырь с зазором – короткозамыкающий поршень с выемкой», использующимся в качестве резонансной системы для ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Данные по распределению поля позволяют разместить зонд СВЧ ближнеполевого микроскопа в области максимальной локализации поля.

*Ключевые слова:* низкоразмерный резонатор, ближнеполевой СВЧ-микроскоп, распределение поля, максимальная локализация поля.

При разработке устройств твердотельной микроэлектроники необходимо контролировать наличие и расположение дефектов в применяемых при их создании материалах. Такие возможности появляются при использовании ближнеполевой СВЧ-микроскопии [1]. Использование эффектов «ближнего» поля обусловленных возникновением высших, нераспространяющихся типов колебаний, в значительной степени снимает ограничения на степень разрешения при проведении количественных измерений исследуемых образцов. Авторы [2] назвали связанный с зондом СВЧ-резонатор сердцем ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающим его высокую чувствительность и разрешающую способность. По изменению характеристик резонатора (резонансной частоты, коэффициента отражения и избирательности) можно определять искомые параметры контролируемых объектов. Очевидно, что с увеличением чувствительности резонатора к вносимому в него через зонд «возмущению» увеличивается чувствительность и разрешающая способность СВЧ-микроскопа в целом.

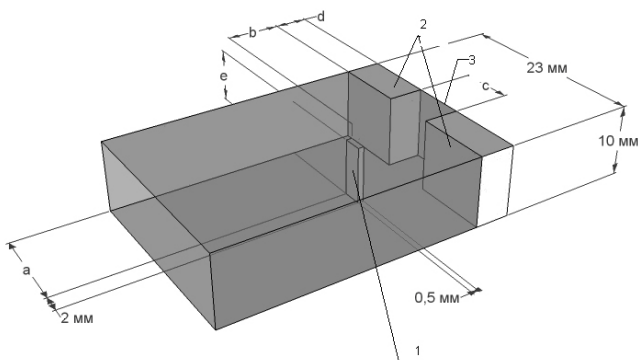
Авторы [3] предложили в качестве такого резонатора для ближнеполевого СВЧ-микроскопа использовать систему «неоднородность – близко расположенный короткозамыкатель», предполагая, что ближнее поле в окрестности неоднородности может в этом случае с короткозамыкателем породить резонанс. При этом один из размеров таких резонаторов оказывается в 30 и бо-

лее раз меньше длины возбуждающей его волны основного типа. Различные конструкции таких резонаторов, названных «низкоразмерными», были экспериментально исследованы и описаны в работах [4–6]. В этих работах была показана возможность создания СВЧ-резонаторов на основе систем «штырь с зазором – близко расположенный короткозамыкатель» и продемонстрирована их высокая чувствительность к возмущающим воздействиям. При этом было установлено, что параметрами резонансов в таких системах можно эффективно управлять [7; 8].

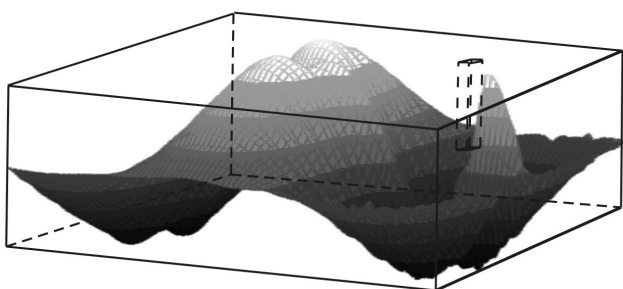
Целью настоящей работы было теоретическое и экспериментальное исследование одного из типов таких резонаторов: «металлический штырь с зазором – короткозамыкающий поршень с выемкой».

При разработке таких резонаторов необходимо знать распределение поля в нем. Данные по распределению поля позволяют разместить зонд СВЧ ближнеполевого микроскопа в области максимальной локализации поля. В настоящее время при расчете устройств СВЧ широко применяются различные численные методы, среди которых наиболее часто используются метод конечных элементов и метод конечных разностей. Во многом схож с ними метод импедансного аналога электромагнитного пространства (ИАЭП) [9].

Метод ИАЭП в отличие от метода конечных элементов основывается на построении эквивалентной схемы устройства, пространство низ-



**Рис. 1.** Схема низкочастотной системы из штыря и близко расположенного короткозамыкателя с выемкой прямоугольной формы: 1 – штырь с зазором; 2 – короткозамыкатель; 3 – выемка прямоугольной формы



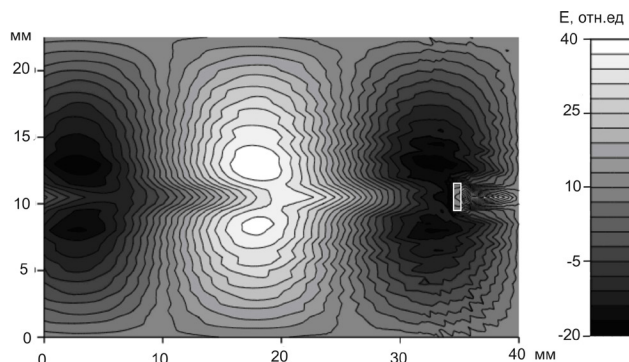
**Рис. 2.** Трехмерное представление распределения поля в волноводе при отсутствии выемки:  $a = 10,5$  мм,  $b = 3$  мм,  $e = 7$  мм

коразмерного резонатора при этом разбивается на кубические элементы, каждой грани которых приводится в соответствие эквивалентная схема пары отрезков линий передачи, причем эквивалентные схемы граней связаны посредством балансного трансформатора в центре кубического элемента. Все кубические элементы соединяются в единую сетку, образуя тем самым эквивалентную схему устройства [9].

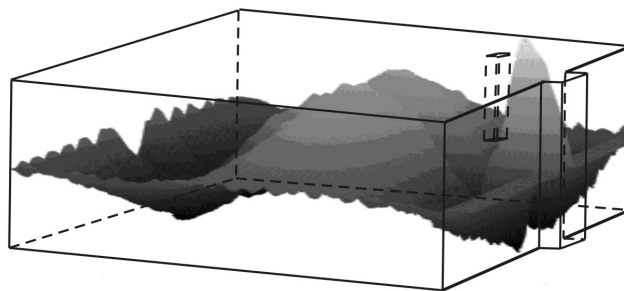
В данной статье нами показана возможность применения метода ИАЭП к расчету полей в низкочастотной системе (рис. 1) из штыря с зазором (1) и близко расположенного короткозамыкателя (2) с выемкой прямоугольной формы (3).

Вычислительный алгоритм был реализован в программной среде Delphi 7. Расчет производился для волновода сечением  $23 \times 10$  мм<sup>2</sup> и частоты 8 ГГц. Схематическое изображение описываемой конструкции приведено на рис. 1. При моделировании ширина штыря составляла 2 мм, толщина – 0,5 мм.

Было проведено численное моделирование (рис. 2, 3) распределения поля при наличии штыря и отсутствии выемки ( $c = 0$ ). Штырь располагался на расстоянии  $a = 10,5$  мм от узкой стенки волновода и  $b = 3$  мм от короткозамыка-



**Рис. 3.** Двумерное представление распределения поля в волноводе при отсутствии выемки:  $a = 10,5$  мм,  $b = 3$  мм,  $e = 7$  мм



**Рис. 4.** Трехмерное представление распределения поля в волноводе при наличии выемки:  $a = 10,5$  мм,  $b = 3$  мм,  $e = 7$  мм,  $c = 2$  мм,  $d = 2$  мм

теля, что составляет  $\sim \lambda_g/30$ , его высота при этом составляла  $e = 7$  мм.

Также было численно исследовано распределение поля при наличии штыря и прямоугольной выемки в короткозамыкателе (рис. 4, 5). Штырь располагался на расстоянии  $a = 10,5$  мм от узкой стенки волновода и  $b = 3$  мм от короткозамыкателя, его длина при этом составляла  $e = 7$  мм. Выемка располагалась симметрично относительно оси волновода и имела ширину  $c = 2$  мм и глубину  $d = 2$  мм.

Данные расчета, приведенные на рис. 2–5, свидетельствуют о том, что локализация электрического поля в низкочастотном резонаторе при наличии выемки возрастает по сравнению с системой без выемки.

Было проведено экспериментальное определение распределения поля в поперечном сечении волновода. Измерения проводились на установке, схема которой изображена на рис. 6. Источником СВЧ-сигнала служил генератор качающейся частоты типа ГКЧ-61 (3). Сигнал от генератора поступал в волноводный тракт (1), содержащий в качестве оконечного устройства рассмотренный выше низкочастотный резонатор. Широкая стенка волновода была выполнена с пазом шириной 23 мм и длиной 50 мм, который

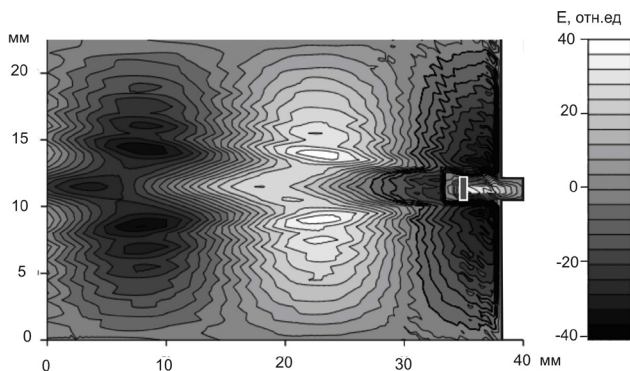


Рис. 5. Двумерное представление распределения поля в волноводе при наличии выемки:  $a = 10,5$  мм;  $b = 3$  мм;  $e = 7$  мм;  $c = 2$  мм;  $d = 2$  мм

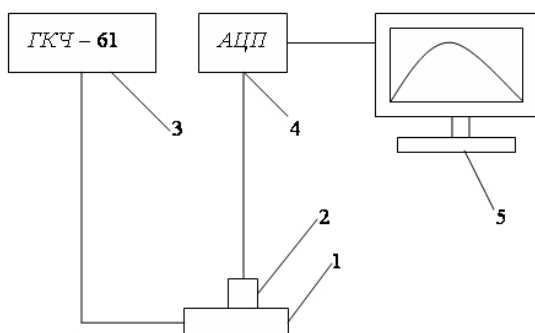


Рис. 6. Схема установки для определения распределения поля в волноводе: 1 – волновод; 2 – детекторная головка; 3 – генератор качающейся частоты типа ГКЧ-61; 4 – аналогово-цифровой преобразователь типа L-Card E14-140; 5 – компьютер

закрывался сверху металлической пластиной, способной перемещаться с помощью микрометрического винта от одной узкой стенки волновода к другой. В пластине выполнено технологическое отверстие, через которое в волновод вводился заостренный зонд на глубину 0,2 мм, связанный через петлю связи с детекторной головкой (2), закрепленной на внешней стороне пластины. Полученный сигнал, несущий информацию о величине напряженности СВЧ-поля, через аналогово-цифровой преобразователь типа L-Card E14-140 (4) поступал в компьютер (5) для последующей обработки с использованием программной среды MathCAD.

На рис. 7 приведено сравнение результатов теоретического расчета (штриховая кривая) с экспериментальными значениями (сплошная кривая) распределения СВЧ-поля в поперечном сечении волновода на расстоянии 2 мм от короткозамыкателя при наличии штыря и отсутствии выемки.

На рис. 8 приведено сравнение результатов теоретического расчета (штриховая кривая) с экспериментальными значениями (сплошная кривая) распределения СВЧ-поля в поперечном

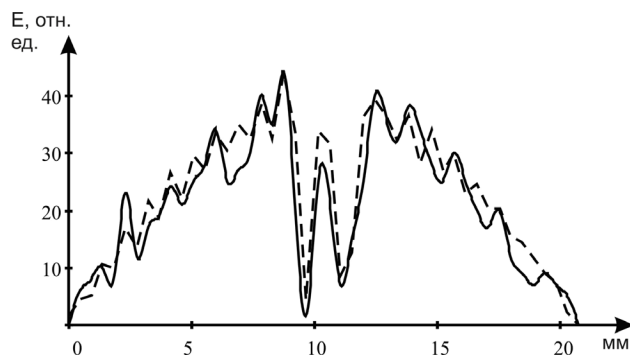


Рис. 7. Распределение СВЧ-поля в поперечном сечении волновода при отсутствии выемки (штриховая кривая – расчет; сплошная кривая эксперимент)

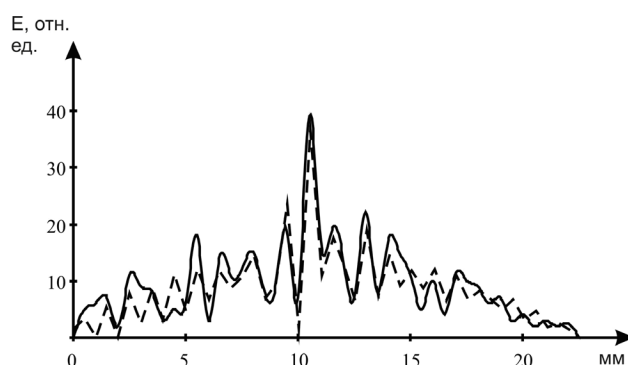


Рис. 8. Распределение СВЧ-поля в поперечном сечении волновода при наличии выемки (штриховая кривая – расчет; сплошная кривая эксперимент)

сечении волновода на расстоянии 2 мм от короткозамыкателя при наличии штыря и выемки. Размещение элемента связи с зондом ближнеполевого микроскопа в окрестности локализации поля в резонаторе открывает возможность повышения его чувствительности к возмущающему воздействию, вносимого измеряемым объектом.

Из вида распределения поля, приведенного на рис. 8, следует, что оно представляет собой результат трансформации поля волны  $H_{10}$  в совокупность высших нераспространяющихся типов волн, локализованную в ограниченном объеме. Именно нераспространяющиеся типы волн образуют зондирующее поле в ближнеполевым СВЧ-микроскопе. Поэтому вывод через элемент связи такого поля в резонаторе к зонду микроскопа лучше соответствует требованию к формированию на конце зонда ближнего поля. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 946 и 1376), Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0030).*

## Список литературы

1. Усанов Д.А. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. 100 с.
2. Near-field microwave microscopy of materials properties / S.M. Anlage [et al.] // Microwave Superconductivity. Amsterdam: Kluwer, 2001. P. 239.
3. Пат. № 2373545 РФ МПК G01R27/26. Устройство для измерения параметров материалов / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, А.Н. Сорокин, В.Ю. Кваско. Опубл. 20.11.09. Бюл. № 32.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в волноводной системе «штырь с зазором – близкорасположенный поршень» // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49. № 2. С. 27–33.
5. 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.
6. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системе диафрагма-короткозамыкающий поршень // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44. № 12. С. 1046–1049.
7. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Электрически управляемый СВЧ-резонатор // ПТЭ. 2006. № 3. С. 100–102.
8. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Управляемый магнитным полем СВЧ-выключатель на *p-i-n*-диодах // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 1. С. 72–73.
9. Иванов С.А., Сестрорецкий Б.В., Боголюбов А.Н. Метод импедансного аналога электромагнитного пространства для решения начально-краевых задач электродинамики // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9. С. 274–304.

## Low-dimensional resonator for near-field microwave-microscope

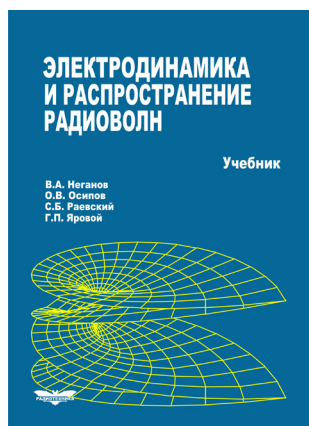
*D.A. Usanov, S.S. Gorbатов, V.Y. Kvasko, A.V. Fadeev*

Studied theoretically and experimentally the field distribution in the cavity of the «metal post with a gap – shorting piston with recess» is used as a resonant system for near-field microwave microscope. Distribution fields allow you to place a near-field microwave probe microscope in the region of maximum field localization.

*Keywords:* low-dimensional resonator, microwave microscope, near-field distribution, the maximum localization field.

**Неганов, В.А.**

**Электродинамика и распространение радиоволн:** учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)  
ББК 22.3  
Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Осуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

*Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.*