

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОКОАКСИАЛЬНОГО ЗОНДА
БЛИЖНЕПОЛЕВОГО СВЧ-МИКРОСКОПА С РЕЗОНАТОРОМ В ВИДЕ
ОТРЕЗКА ВОЛНОВОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ»

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
МАГИСТРА

студента 2 курса

по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Хлопкова Алексея Васильевича

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

А.П. Фролов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов, 2018

Введение

Ближнеполевая СВЧ-микроскопия – это неразрушающий метод исследования, позволяющий исследовать малоразмерные объекты с высокой степенью локальности, базируется на регистрации СВЧ-воздействия, локализованного в ближнем поле зонда.

СВЧ-микроскопия обладает рядом преимуществ: электромагнитная волна не имеет массы и электрического заряда, свободно распространяется в воздухе и многих диэлектрических материалах, легко изменяет поляризацию, может иметь сравнительно большую длину волны и т.д.

Таким образом, с помощью СВЧ-микроскопа можно определять не только геометрию поверхности объектов, но и параметры материалов под поверхностью, за счет проникновения СВЧ-излучения в объем структуры. Это является основным достоинством СВЧ-микроскопа по сравнению с туннельным и атомно-силовым микроскопами.

Ближнеполевые СВЧ-микроскопы, в отличие от оптических, не ограничены дифракционным пределом, разрешающая способность превосходит длину волны используемого излучения на несколько порядков. В таких микроскопах используется эффект «ближнего поля» – образование квазистационарных полей, быстро затухающих с расстоянием и локализуемых в малой окрестности излучающей системы. Располагая исследуемый объект в области существования этого поля, можно исследовать распределение его электрофизических свойств с разрешением, намного меньшим, чем длина волны используемого излучения.

Для того чтобы достичь высокого быстродействия современная электроника работает на больших частотах. СВЧ-микроскоп позволяет исследовать параметры электронных структур на тех частотах, на которых и планируется их использование.

Целью выпускной квалификационной работы магистра являлось разработка и исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода со структурой, состоящей из диэлектрической поликоровой пластины с нанесенным на неё нанометровым проводящим слоем.

Для достижения этой цели было выполнено:

- при помощи системы автоматизированного проектирования *High Frequency Structural Simulator v15* и системы *MathCAD* смоделирован отрезок волновода с помещенной в него поликоровой пластиной,
- смоделирован отрезок волновода с помещенной в него поликоровой пластиной, имеющей нанометровый проводящий слой,
- смоделирован микрокоаксиальный зонд ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода со структурой, из диэлектрической поликоровой пластины с нанесенным на неё нанометровым проводящим слоем.

Для определения возможности измерения параметров диэлектрических материалов была проведена параметризация:

– действительной части диэлектрической проницаемости измеряемого материала,

– мнимой части диэлектрической проницаемости измеряемого материала,

Проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода с помещенной в него структурой, состоящей из диэлектрической поликоровой пластины и нанесенным на неё нанометровым проводящим слоем

Расчет амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода

На основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft исследовалось взаимодействие электромагнитного поля с системой на основе модели микрокоаксиального зонда СВЧ-микроскопа, созданной по параметрам уже существующего микрокоаксиально-волноводного перехода.

С целью создания резонансной моды колебаний в спектральной характеристике коэффициента отражения, в волноведущую часть данной конструкции, помещалась структура, состоящая из поликоровой пластины и нанесенного на неё нанометрового проводящего слоя с удельным сопротивлением $\rho = 33 \text{ Ом}/\square$. Данная структура была помещена в волновод, полностью заполняя его по поперечному сечению (см. рисунок 1).

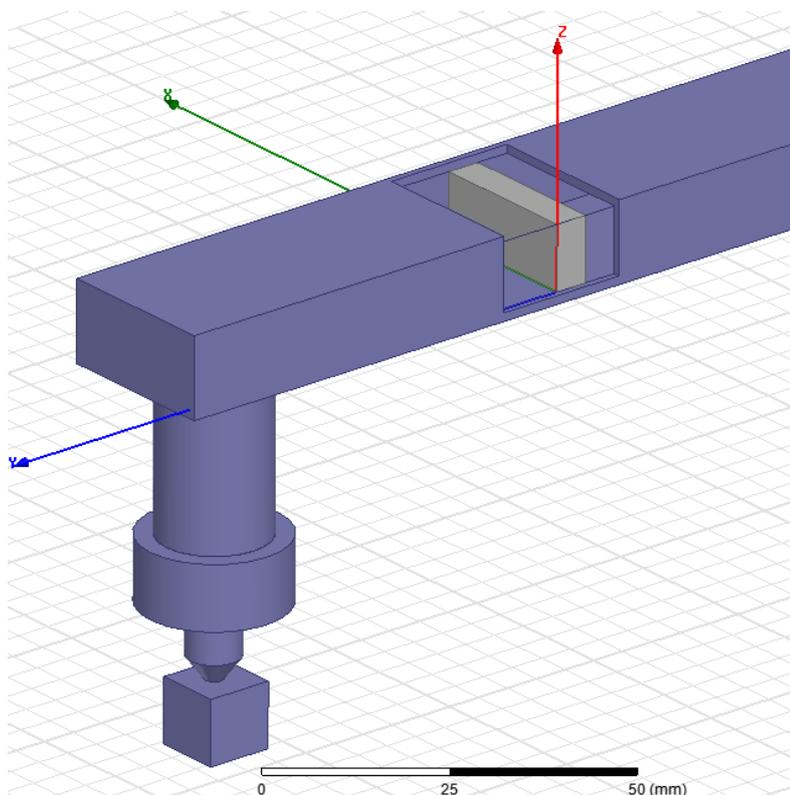


Рисунок 1 Участок волновода с помещенной поликоровой пластиной с нанометровым проводящим слоем, полностью заполняющей волновод по поперечному сечению.

Результаты расчета амплитудно-частотных характеристик компьютерной модели микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода

Для определения амплитудно-частотной зависимости коэффициента отражения S_{11} микрокоаксиального зонда от диэлектрических свойств измеряемого материала было необходимо:

- провести параметризацию действительной части диэлектрической проницаемости измеряемого материала,
- провести параметризацию мнимой части диэлектрической проницаемости измеряемого материала,
- определить чувствительность $\partial S_{11}/\partial h$

В результате проведенных расчетов было выявлено уменьшение коэффициента отражения на резонансной частоте на участке изменения объемной доли спирта в растворе от 0% до 32%. На рисунке 2 представлены амплитудно-частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} микрокоаксиального зонда

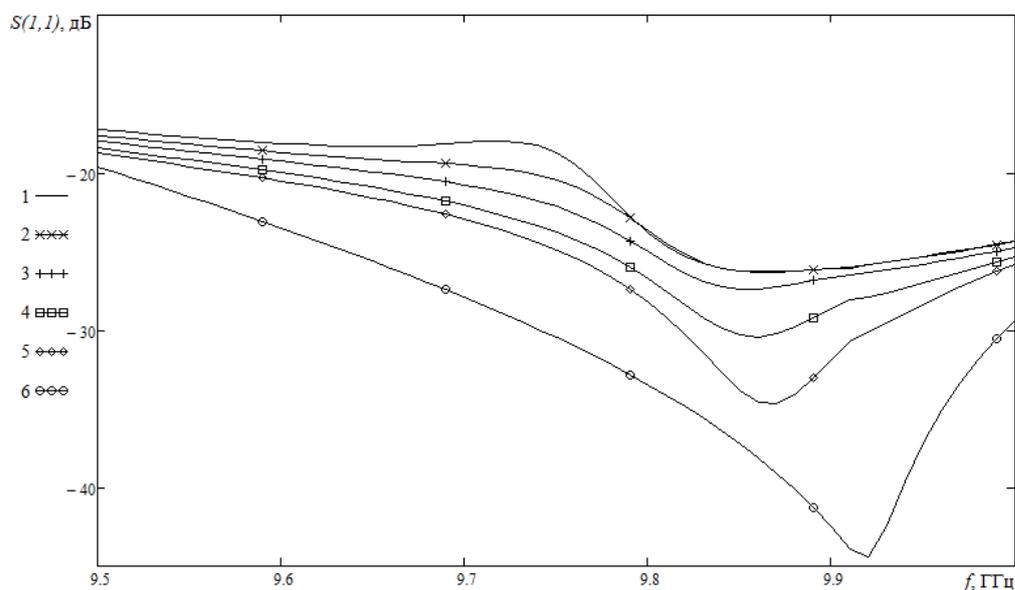


Рисунок 2 Амплитудно-частотные зависимости коэффициента отражения $S(1,1)$ микрокоаксиального зонда, при помещенной внутрь волновода поликоровой пластине с нанометровым проводящим слоем и при различной объемной доли спирта. 1- $\varphi=0\%$, 2- $\varphi=9\%$, 3- $\varphi=16\%$, 4- $\varphi=22\%$, 5- $\varphi=27\%$, 6- $\varphi=32\%$

Как следует из результатов, представленных на рисунке 40, на частоте $f \sim 9,9$ ГГц при изменении объемной доли спирта φ от 0 % до 32 % наблюдается уменьшение коэффициента отражения. Средняя чувствительность $\partial S_{11}/\partial\varphi$, составляет 0.4 дБ/%, а наибольшая чувствительность $\partial S_{11}/\partial\varphi$, наблюдалась на участке от 27% до 32% и достигала 1,95 дБ/% .

В дальнейшем, при увеличении объемной доли спирта и уменьшении диэлектрической проницаемости происходило увеличение коэффициента отражения. Результат полученных данных изображен на рисунке 3.

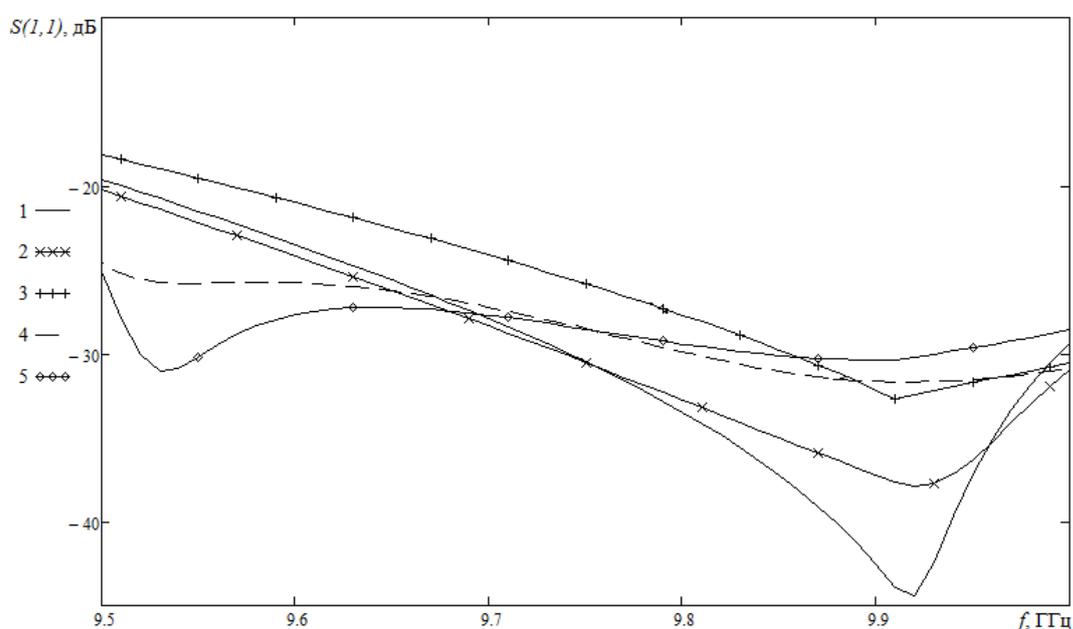


Рисунок 3 Амплитудно-частотные зависимости коэффициента отражения $S(1,1)$ микроаксиального зонда, при помещенной внутрь волновода поликоровой пластине с нанометровым проводящим слоем и при различной объемной доли спирта. 1- $\varphi=32\%$, 2- $\varphi=36\%$, 3- $\varphi=40\%$, 4- $\varphi=43\%$,5- $\varphi=45\%$

Средняя чувствительность $\partial S_{11}/\partial\varphi$, составляет 0,98 дБ/%, а наибольшая чувствительность $\partial S_{11}/\partial\varphi$, наблюдалась на участке от 32% до 36% и достигала 1.64 дБ/% .

По результатам компьютерного моделирования видно, что структура, состоящая из поликоровой пластины и нанесенного на неё нанометрового проводящего слоя, может являться частью резонатора.

Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода с помещенной внутрь структурой, состоящей из поликоровой пластины и нанесенного на неё нанометрового проводящего слоя

Исследовались высокочастотные характеристики СВЧ-устройства на основе резонатора в виде отрезка волновода с помещенной внутрь структурой, состоящей из поликоровой пластины и нанесенного на неё нанометрового проводящего слоя. Волновод соединен с микрокоаксиальным переходом, центральный проводник которого выступает за пределы внешнего проводника на величину порядка 1 мм. Зонд данного устройства погружался на 1 мм в объем исследуемого диэлектрического раствора. Высокочастотные характеристики приведенного СВЧ-устройства исследовались с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5232A.

С целью создания резонансной моды колебаний на спектральной характеристике коэффициента отражения, в волноведущую часть данной конструкции, помещалась структура, состоящая из нескольких поликоровых пластин, одна из которых имела напыленный нанометровый проводящий слой

На рисунке 4 представлено семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения S_{11} микрокоаксиального зонда,

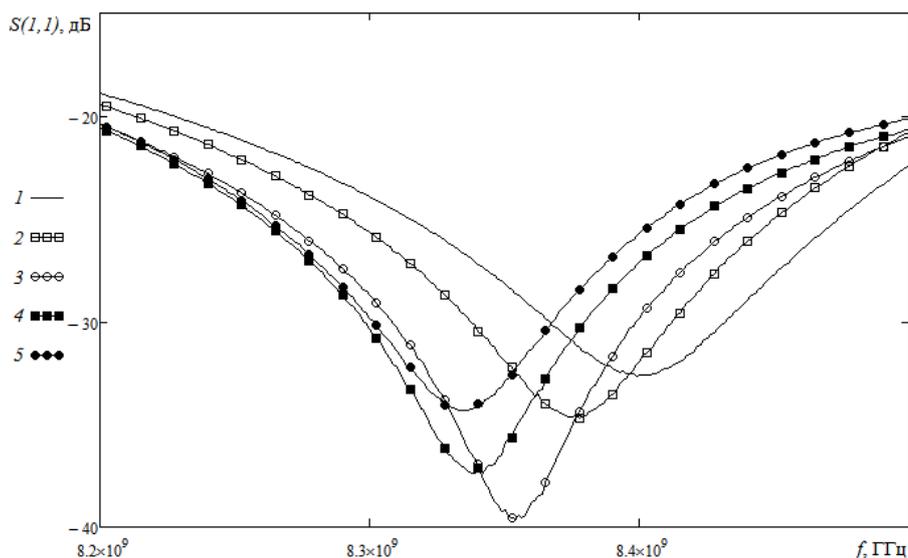


Рисунок 4 Семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения S_{11} микроаксиального зонда, для различных объемных долей φ спирта.

a) общий вид амплитудно-частотных характеристик

b) амплитудно-частотные характеристики на частоте $f \sim 8.35$ ГГц при:

1 - $\varphi = 0\%$; 2 - $\varphi = 16\%$, 3 - $\varphi = 32\%$, 4 - $\varphi = 40\%$. 5 - $\varphi = 48$

Как следует из результатов, представленных на рисунке 4, на частоте $f \sim 8.35$ ГГц при изменении объемной доли спирта φ от 0 % до 32 % наблюдается уменьшение коэффициента отражения. Средняя чувствительность $\partial S_{11}/\partial\varphi$, составляет 0,22 дБ.

В дальнейшем, при увеличении объемной доли спирта и уменьшении диэлектрической проницаемости происходило увеличение коэффициента отражения. Средняя чувствительность $\partial S_{11}/\partial\varphi$, составляет 0,33 дБ.

На основе полученных результатов была построена калибровочная кривая для четырех частот (см. рисунок 5).

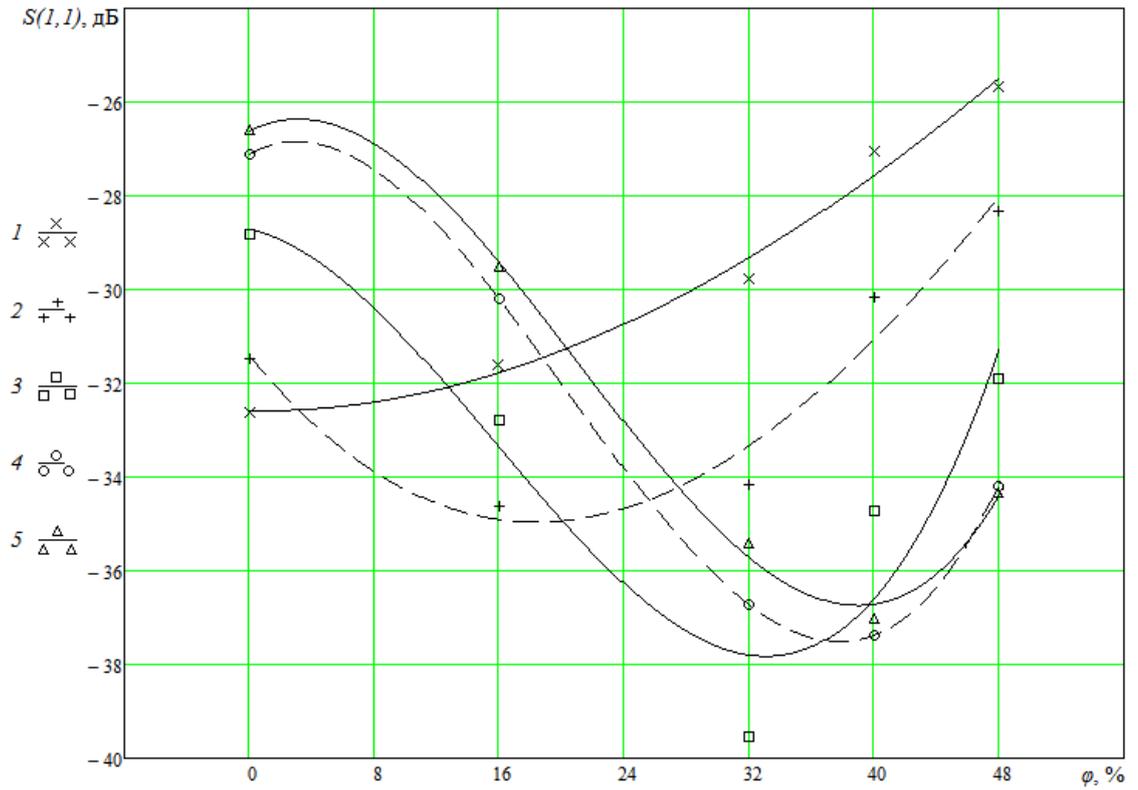


Рисунок 5 Калибровочные кривые на четырех частотах измерения:

1 - $f = 8,4$ ГГц; 2 $f = 8,38$ ГГц, 3 $f = 8,36$ ГГц, 4 $f = 8,34$ ГГц, 5 $f = 8,33$ ГГц

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы магистра показана возможность создания резонатора на основе волноведущей секции с помещенной внутрь структурой, состоящей из поликоровой пластины и нанесенного на неё нанометрового проводящего слоя.

Были рассчитаны резонаторы на основе двух типов волноводов:

- прямоугольный волновод
- отрезок коаксиальной линии передачи.

Смоделирован микрокоаксиальный зонд ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка прямоугольного волновода.

Проведен расчет амплитудно-частотной характеристики при помещенной в волновод структурой, состоящей из поликоровой пластины с напыленным нанометровым проводящим слоем. Для определения возможности измерения параметров диэлектрических материалов была проведена параметризация:

– действительной части диэлектрической проницаемости измеряемого материала,

– мнимой части диэлектрической проницаемости измеряемого материала.

Проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода с помещенной в него структурой, состоящей из поликоровой пластины с напыленным нанометровым проводящим слоем.

Список используемых источников

1. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения / Д.А. Усанов. — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. — 100 с.
2. Near-field microwave microscopy of materials properties” in Microwave Superconductivity / S.M.Anlage, D.E.Steinbauer, B.J.Feenstra et al. / Eds. H. Weinstock and M. Nisenoff. — Amsterdam. The Netherlands: Kluwer, 2001. — P. 239–269.
3. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системе диафрагма–короткозамыкающий поршень // Изв. вузов. Радиофизика. — 2001. — Т.44, № 12. — С. 1046–1049.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Волноводный измерительный резонатор // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2002. — Т.45. — № 9. — С. 26–28.
5. Kleismit R. A., Kazimierczuk M. K. and Kozlowski G. Sensitivity and Resolution of Evanescent Microwave Microscope // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2006. — Vol. 54. — N 2. — P. 639–647.
6. S.M. Anlage, D.E. Steinbauer, B.J. Feenstra, C.P. Vlahacos, F.C. Wellstood. Near-Field Microwave Microscopy of Materials Properties // Microwave Superconductivity. — Amsterdam. — 2001. — P. 239-269.
7. T. Norokido, I. Vac, K. Mirumo. scanning Near-Field Millimeter-Wave Microscopy Using a Metal Hit as a Scanning Probe // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2001. — V.49. — № 3. — P. 491-499.
8. M. Gobovsky, A. Galkin, D. Davidov. High-spatial resolution resistivity mapping of large-area YBCO films by a near- field millimeter-wave microscope // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, 1996. — V. 44. — № 7. — P. 1390-1392.
9. Ближнеполевая СВЧ микроскопия и области ее применения Д.А. Усанов – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. – 100 с.