

На правах рукописи

КАРЕВ Дмитрий Виталиевич

**МИКРОВОЛНОВОЙ МЕТОД И
УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ
МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные системы и приборы» Тамбовского государственного технического университета

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Мордасов Михаил Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Чернышов Владимир Николаевич

кандидат технических наук

Тен Валерий Валентинович

Ведущая организация **Тамбовский военный авиационный инженерный институт (ТВАИИ)**

Защита состоится 10 декабря 2004 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000 г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000 г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, большой зал, ученому секретарю совета Д 212.260.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тамбовского государственного технического университета.

Автореферат диссертации разослан " ____ " ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.А. Чуриков

Подписано к печати 02.11.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 1,0 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 746

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современном мире технический прогресс в различных отраслях промышленности определяется совершенствованием известных и созданием новых технологий. Особое внимание уделяется исследованиям и разработкам методов и средств получения информации о параметрах технологических процессов и показателях качества веществ, материалов и изделий. Для качественного управления новыми технологическими процессами требуется получение значительного количества измерительной информации, а к средствам контроля предъявляются все более высокие требования по быстродействию и точности.

Производство композиционных материалов и контроль качества готовой продукции требует измерения толщины слоя гетерогенных дисперсных жидких сред, таких как ферромагнитные жидкости (ФМЖ), применяемые в технологиях лакокрасочных покрытий, а также в производстве радиозащитных материалов (РЗМ).

Контроль качества продукции заключается в проверке соответствия ее качества установленным требованиям. Важными критериями качества покрытий на металле являются геометрические показатели, а также технологические признаки качества, например, отсутствие недопустимых дефектов типа нарушения сплошности.

В производстве широко применяют неразрушающий контроль, позволяющий проверить качество продукции без нарушения ее годности к использованию по назначению. При этом особая роль в повышении эффективности производства и улучшения качества продукции отводится автоматическим средствам измерения.

Актуальной и требующей скорейшего разрешения является проблема контроля толщины многослойных покрытий в процессе их нанесения и финишного контроля результатов этого процесса. Причем большое внимание придается скорости сканирования относительно больших по площади поверхностей с высокой разрешающей способностью локальных измерений.

Широкий спектр материалов и покрытий приводит к необходимости применения специализированных приборов и сложных методик контроля толщины их слоя. Многие из известных методов измерения толщины магнетодиэлектрических покрытий чувствительны к изменению ряда неконтролируемых параметров, таких как диэлектрическая и магнитная проницаемости, которые могут изменяться в процессе сушки и затвердевания слоя.

Все приведенное выше определяет актуальность проведения исследований и разработок методов и устройств измерения толщины слоя магнетодиэлектрических покрытий, а также обоснование их технической реализуемости.

Цель работы. Разработать бесконтактный метод измерения толщины слоя магнетодиэлектрических покрытий на металле в процессе их нанесения и финишного контроля результата, с учетом влияния неконтролируемых параметров: диэлектрической и магнитной относительной проницаемостей.

Методы исследования основаны на применении теории электродинамики, математическом моделировании и метрологии.

Научная новизна. Разработан СВЧ метод измерения толщины слоя b магнетодиэлектрических покрытий на металле с учетом влияния неконтролируемых параметров: относительной диэлектрической ϵ и относительной магнитной проницаемости μ . Метод основан на эффекте взаимодействия электромагнитного поля со слоем магнетодиэлектрического покрытия на металле и обладает высоким быстродействием, точностью и локальностью измерения. Метод не чувствителен к величине зазора между датчиком и контролируемым слоем.

Практическая ценность. Используя предложенный метод, разработано устройство бесконтактного быстродействующего измерения толщины слоя b магнетодиэлектрических покрытий на металле.

Реализация результатов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы апробированы и рекомендованы к внедрению в практику аналитического контроля в ОАО «Котовский лакокрасочный завод» (Тамбовская обл. г. Котовск) и в учебном процессе ТВАИИ.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались на 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» МГТУ им. Баумана (Москва, 1999), 5-й Научно-методической конференции ТГТУ (Тамбов, 2000), 14-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях»

(Смоленск, 2001), II Международной научной конференции «Измерения, контроль, информатизация» Алтайский ГТУ (Барнаул, 2001), Четвертой международной теплофизической школы «Теплофизические измерения в начале XXI века» ТГТУ (Тамбов, 2001), 15-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ТГТУ (Тамбов, 2002).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе получен один патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы и 11 приложений, работа изложена на 150 стр, содержит 79 рисунков, 3 таблицы и 62 наименования библиографического указателя.

Автор благодарит д-ра техн. наук, профессора Д.А. Дмитриева и канд. техн. наук П.А. Федюнина за консультации при работе над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, показаны результаты реализации и апробации, изложено краткое содержание глав.

В первой главе «**Литературный обзор и постановка задачи исследования**» произведен сравнительный анализ существующих методов и устройств контроля толщины покрытий. Приведены достоинства и недостатки электрических и магнитных методов.

Рассмотрены конструкции вихретоковых и емкостных датчиков. Произведен сравнительный анализ средств толщинометрии покрытий. На основе проведенного анализа были установлены основные недостатки, сужающие возможность их применения. Сюда, в первую очередь, следует отнести: малое быстродействие сканирования больших поверхностей, нелокальность измерений, влияние неконтролируемых параметров, высокую чувствительность к переменной величине зазора между полеобразующими поверхностями проводящих элементов и контролируемым слоем.

В главе дана классификация радиоволновых СВЧ методов и средств контроля параметров покрытий.

Обоснована необходимость разработки нового бесконтактного СВЧ метода контроля толщины слоя магнитодиэлектрических покрытий на металле с учетом влияния неконтролируемых параметров: относительной диэлектрической и относительной магнитной проницаемости контролируемого слоя.

Во второй главе «**Математическое описание взаимодействия поверхностных волн с магнитодиэлектрическим слоем на металлической поверхности**» дано математическое описание процесса взаимодействия электромагнитного поля с магнитодиэлектрическим покрытием на металле и предложен метод быстрого определения электрофизических свойств и толщины слоя таких покрытий.

Решена краевая задача распространения медленной волны над неограниченной системой «магнитодиэлектрик-проводник».

Возбуждаемое электромагнитное поле, описываемое уравнениями Максвелла в слое диэлектрика и в окружающем пространстве, удовлетворяет условиям излучения, а также граничным условиям на металлической поверхности и на поверхности раздела диэлектриков.

Рассмотрим структуру, образованную металлической плоскостью, покрытой слоем магнитодиэлектрика толщиной b , с диэлектрической ϵ_{a1} и магнитной μ_{a1} проницаемостями (рис. 1). Внутри слоя находится параллельная металлической плоскости бесконечная прямолинейная нить синфазного электрического \vec{j}_e (источник H -мод) или фиктивного магнитного тока \vec{j}_m (источник E -мод). Для реальных (ограниченных) излучателей часть фронта неоднородной волны (рис. 2) в дальней зоне (ДЗ) можно также рассматривать как часть поля, возбужденного идеальным синфазным источником бесконечной длины.

Система расположена в пространстве с однородными параметрами ϵ_a, μ_a . Считаем, что $\epsilon_{a1} > \epsilon_a$ и $\mu_{a1} > \mu_a$.

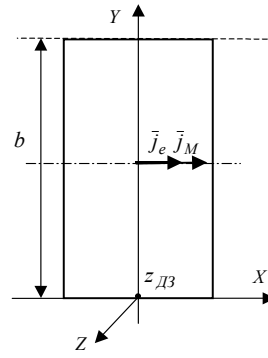
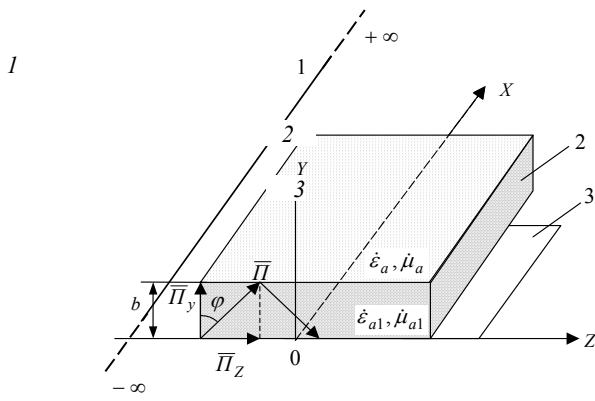


Рис. 1 Распространение медленной волны в замедляющей структуре:

1 – нить синфазного тока; 2 – слой диэлектрика; 3 – металлическая плоскость

Рис. 2 Срез фронта волны в дальней зоне

Если угол φ , составленный вектором Пойнтинга электромагнитной волны $\bar{\Pi} = \bar{\Pi}_y + \bar{\Pi}_z$ и осью y , равен или больше угла полного внутреннего отражения

$$\varphi_{\text{ВО}} = \arcsin \sqrt{\frac{\mu_a \varepsilon_a}{\mu_{a1} \varepsilon_{a1}}}, \quad (1)$$

то такая волна отразится от границы раздела с воздухом и, попав под тем же углом на другую границу раздела, вновь отразится от нее. Этот процесс будет продолжаться по мере продвижения волны вдоль оси z . В результате в диэлектрической пластине возникает быстрая волна обычного волноводного типа, распространяющаяся в пластине с фазовой скоростью V_ϕ , превышающей скорость света в диэлектрике c . В соответствии с явлением полного внутреннего отражения в воздухе у поверхностей пластины образуется медленная волна, распространяющаяся вдоль оси z , с фазовой скоростью, меньшей скорости света в воздухе c_0 . Обе волны (внутренняя и внешняя) образуют единое электромагнитное поле с одной и той же фазовой скоростью, удовлетворяющей неравенству

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_{a1} \varepsilon_{a1}}} < V_\phi < c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_a \varepsilon_a}}. \quad (2)$$

Важнейшим свойством медленной волны, является ее поверхностный характер, характеризуемый экспоненциальным затуханием напряженности поля E в нормальном по отношению к вектору Пойнтинга $\bar{\Pi}_z$ направлении над замедляющей структурой

$$E(y) = E_0 \exp(-\alpha_y y), \quad (3)$$

где E_0 – напряженность поля непосредственно над поверхностью.

Таким образом, явление полного внутреннего отражения сопровождается возникновением своеобразной волны, распространяющейся вдоль границы раздела и затухающей по экспоненте в направлении, перпендикулярном границе раздела. Затухание волны в этом направлении не связано с распространением в среде с потерями и, следовательно, носит недиссипативный характер.

Для E -мод электромагнитного поля величина коэффициента затухания определяется из выражения

$$\alpha_{yE} = \frac{2\pi}{\varepsilon \lambda_\Gamma} \sqrt{\varepsilon \mu - 1 - \left(\frac{\alpha_{yE} \lambda_\Gamma}{2\pi} \right)^2} \operatorname{tg} \left[\frac{2\pi b}{\lambda_\Gamma} \sqrt{\varepsilon \mu - 1 - \left(\frac{\alpha_{yE} \lambda_\Gamma}{2\pi} \right)^2} \right], \quad (4)$$

а для H -мод

$$\alpha_{yH} = \frac{2\pi}{\mu \lambda_\Gamma} \sqrt{\varepsilon \mu - 1 - \left(\frac{\alpha_{yH} \lambda_\Gamma}{2\pi} \right)^2} \left[-\operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi b}{\lambda_\Gamma} \sqrt{\varepsilon \mu - 1 - \left(\frac{\alpha_{yH} \lambda_\Gamma}{2\pi} \right)^2} \right) \right], \quad (5)$$

где ε – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости слоя; μ – действительная часть относительной магнитной проницаемости слоя; b – толщина покрытия; λ_Γ – длина волны генератора СВЧ.

Геометрическая иллюстрация решения трансцендентных уравнений представлена на рис. 3.

Левая часть уравнений (4)–(5) представляет собой уравнение окружности (кривая 1)

$$(\alpha_{yE(H)}b)^2 + (\beta_{E(H)}b)^2 = (\rho b)^2, \quad (6)$$

где $\rho = \text{const}$ – ее радиус, $\beta_{(E)H} = \frac{2\pi}{\lambda_\Gamma} \sqrt{\varepsilon\mu - 1 - \left(\frac{\alpha_{E(H)}\lambda_\Gamma}{2\pi}\right)^2}$.

Правая часть уравнений (4)–(5) представляет собой уравнение тангенсоиды (кривая 2).

Точки, в которых графики пересекаются, соответствуют корням уравнения для длин волн $\lambda_{\Gamma 1}$, $\lambda_{\Gamma 2}$ и $\lambda_{\Gamma 3}$.

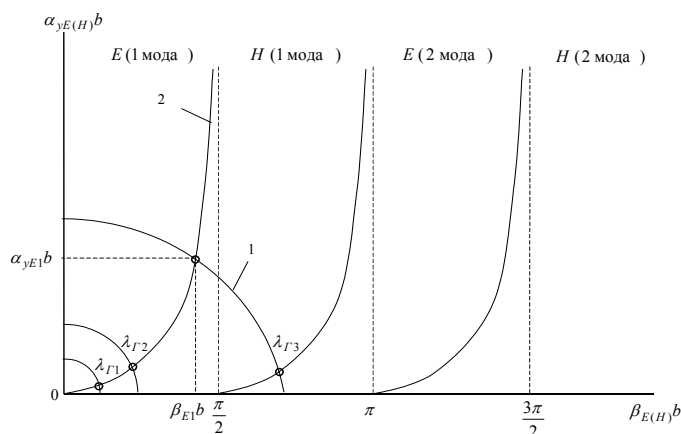


Рис. 3 Геометрическая иллюстрация решений уравнения

В замедляющей структуре возможно одновременное существование конечного количества конкурирующих мод E и H поверхностных волн.

На рис. 4 показаны области существования мод электромагнитных волн и зависимость параметров $\alpha_{E(H)}$, $\beta_{(E)H}b$ от длины волны генератора λ_Γ ($\lambda_{E(H)}^H$ – длина волны, при которой мода возникает).

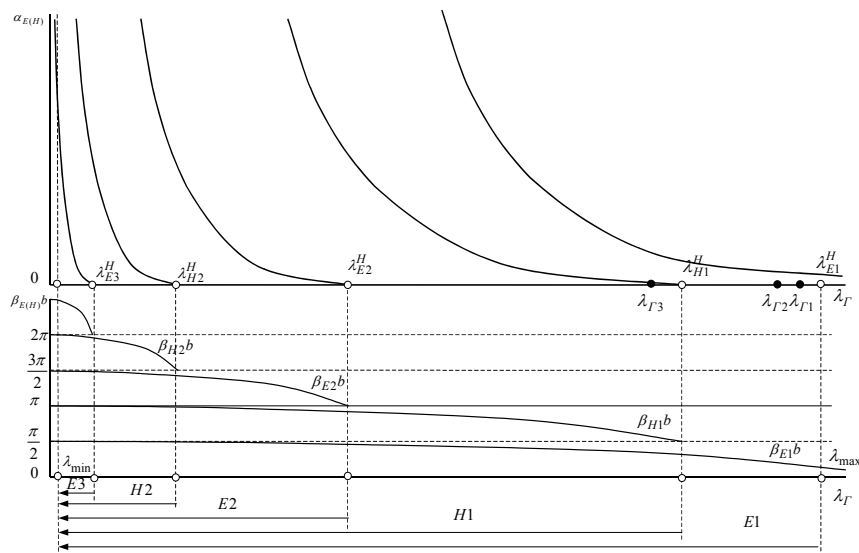


Рис. 4 Зависимость коэффициента затухания от длины волны генератора

График позволяет определять рабочие длины волн для реализации предложенного метода.

Видно, что коэффициенты затухания всех мод E и H кроме последней велики и энергия поля сосредоточена на расстояниях от слоя b настолько малых, что в зоне измерения им можно пренебречь.

Предложен бесконтактный СВЧ метод измерения толщины слоя b с учетом влияния неконтролируемых параметров: относительных диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостей. Метод основан

на эффекте взаимодействия электромагнитного поля поверхностной волны с контролируемым слоем при ее распространении вдоль этого слоя.

В случае отсутствия существенного градиента неоднородностей электрофизических и геометрических параметров исследуемого слоя величина нормального коэффициента затухания напряженности поля α_y не является функцией координаты y . Благодаря этому процесс измерения инвариантен положению датчика по оси y , что является большим преимуществом.

Разработанный метод реализуется следующим образом. Системой излучателей (рис. 5) над магнитоэлектрическим слоем, расположенным на металлической подложке, создается электромагнитное поле в объеме контролируемого материала.

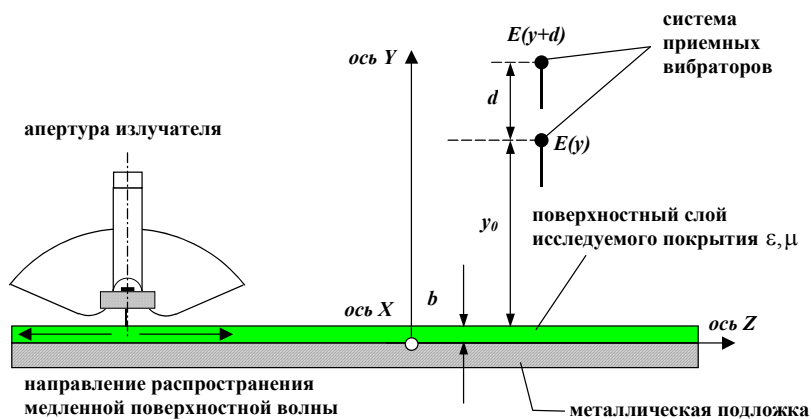


Рис. 5 Схема реализации метода

Системой приемных вибраторов, расположенных на высоте d друг от друга, измеряется напряженность поля E над контролируемой точкой. Условием пренебрежения влияния геометрического и электрофизического градиента исследуемого слоя на характер затухания напряженности поля является измерение при малом значении базы d и на малой высоте y_0 .

Коэффициент нормального затухания α вычисляется из выражения (3), считая $\alpha(y) = \alpha_y = \text{const}$, т.е.

$$\alpha_y = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{E(y)}{E(y+d)} \right]. \quad (7)$$

Для определения толщины слоя b , при известных значениях диэлектрической ϵ и магнитной проницаемостей μ , достаточно решить уравнение (4) или (5).

При отсутствии информации о величине параметров ϵ и μ , а также для учета влияния этих неконтролируемых параметров на величину толщины слоя b , в методе необходимо последовательно возбуждать две E -волны на разных длинах волн $\lambda_{Г1}, \lambda_{Г2}$ и одну H -волну на длине волны $\lambda_{Г3}$. Для определения параметров b, ϵ, μ достаточно решить систему из уравнений (4) при $\lambda_{Г} = \lambda_{Г1}, \lambda_{Г} = \lambda_{Г2}$ и (5) при $\lambda_{Г} = \lambda_{Г3}$.

Затем приемные вибраторы переводят в другую точку исследуемой поверхности и повторяют предыдущий измерительно-вычислительный алгоритм.

Таким образом, метод наряду с определением толщины контролируемого слоя b позволяет определить его диэлектрическую ϵ и магнитную проницаемости μ .

Теоретические зависимости (4) и (5) получены для бесконечных синфазных источников поверхностных волн. Условием пренебрежения влияния конечных размеров реальных несинфазных излучателей на характер распространения поля является измерение напряженности поля в дальней зоне (на расстоянии превышающем $R > 1,6\lambda$ от излучателя) по максимуму диаграммы направленности (ДН).

В главе произведено упрощение модели (4)–(5) и дана оценка погрешности такого упрощения. Показано, что при условии

$$\beta_{Ei}b = \frac{2\pi b}{\lambda_{\Gamma i}} \sqrt{\varepsilon\mu - 1 - \left(\frac{\alpha_{Ei}\lambda_{\Gamma i}}{2\pi}\right)^2} \ll 1, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (8)$$

$$\frac{\pi}{2} < \beta_{H3}b = \frac{2\pi b}{\lambda_{\Gamma 3}} \sqrt{\varepsilon\mu - 1 - \left(\frac{\alpha_{H3}\lambda_{\Gamma 3}}{2\pi}\right)^2} < \frac{\pi}{2} + \Delta, \quad \Delta \ll 1 \quad (9)$$

трансцендентные уравнения (3)–(4) могут быть заменены выражениями:

$$\varepsilon\mu = 1 + \frac{\alpha_{E1}\alpha_{E2}\lambda_{\Gamma 1}\lambda_{\Gamma 2}(\alpha_{E1} - \alpha_{E2})}{4\pi^2(\alpha_{E2}\lambda_{\Gamma 1}^2 - \alpha_{E1}\lambda_{\Gamma 2}^2)}, \quad (10)$$

$$\frac{b}{\varepsilon} = \frac{\alpha_{E1}\lambda_{\Gamma 1}^2}{4\pi^2(\varepsilon\mu - 1) - \alpha_{E1}^2\lambda_{\Gamma 1}^2}, \quad (11)$$

$$\mu = \frac{\beta_{H3}}{\alpha_{H3}} \left(\beta_{H3}b - \frac{\pi}{2} \right). \quad (12)$$

Действительная часть относительной магнитной проницаемости большинства материалов для используемого СВЧ диапазона $\lambda_{\Gamma} = 8,1 \cdot 10^{-2}$ м практически равна единице. В этом случае система уравнений (10)–(12) упрощается:

$$b = \frac{\alpha_{E1}\lambda_{\Gamma 1}^2\varepsilon}{4\pi^2(\varepsilon - 1) - \alpha_{E1}^2\lambda_{\Gamma 1}^2}, \quad (13)$$

$$\varepsilon = 1 + \frac{\alpha_{E1}\alpha_{E2}\lambda_{\Gamma 1}\lambda_{\Gamma 2}(\alpha_{E1} - \alpha_{E2})}{4\pi^2(\alpha_{E2}\lambda_{\Gamma 1}^2 - \alpha_{E1}\lambda_{\Gamma 2}^2)}. \quad (14)$$

В третьей главе «**Разработка устройств для реализации метода**» произведен анализ существующих внутренних и внешних апертур с целью выбора варианта апертуры применительно к поставленной задаче.

Проведенный анализ показал, что не существует ярко выраженного оптимального положения ДН внешнего излучателя, так как доля энергии отраженной или преломленной прямой волны существенно снижает точность измерения.

Была поставлена задача проектирования формы апертуры излучающей системы, обеспечивающей максимум энергии волны в магнитоэлектрическом слое на металле. Для этого необходимо обеспечить такую диаграмму направленности излучателя по углу места, чтобы с одной стороны наблюдалось полное внутреннее отражение в слое, а с другой – не было отраженной прямой волны от поверхностного слоя.

В качестве внутреннего излучателя была разработана электронно-управляемая по максимуму ДН секториальная апертура, обладающая большей мощностью излучения по сравнению с обычной синфазной круговой апертурой. При этом подстилающая металлическая подложка входит в излучающую систему. Показаны преимущества апертуры применительно к решаемой задаче, по сравнению с узкона-

правленными излучателями. Это, в первую очередь, непрерывная по азимуту всенаправленность, отсутствие необходимости вращения и достаточно простая конструкция.

Для разработанной апертуры предложен ряд усовершенствований с целью повышения их эффективности. Это, в частности, отсекаТЕЛЬ прямой волны в дальней зоне и корпус из поглощающего покрытия, уменьшающий паразитные излучения токов.

Поставлена и решена задача конструирования специального электромагнитного экрана – отсекателя прямой волны, помещенного в раскрытие апертуры, с целью уменьшения мощности паразитного излучения.

Показано соответствие санитарным нормам при работе с источниками электромагнитного излучения СВЧ диапазона.

В четвертой главе «Экспериментальная оценка метода и его метрологический анализ» произведена экспериментальная оценка метода и его метрологический анализ.

На рис. 6 показана схема экспериментальной установки.

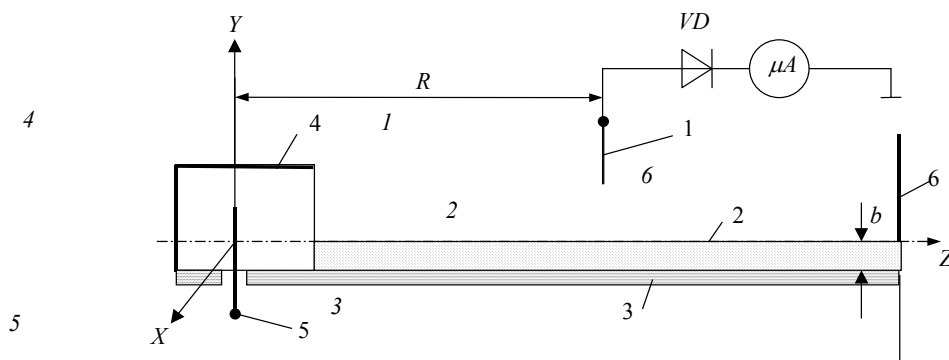


Рис. 6 Схема экспериментальной установки:

- 1 – приемная антенна; 2 – контролируемый слой; 3 – металлическая подложка, входящая в нижнюю часть апертуры; 4 – волноводная апертура;
- 5 – вибратор излучателя; 6 – электромагнитный экран

Измерения проводились по максимуму ДН (центр слоя $x = 0$) на двух основных частотах генератора $f_{Г1} = 3705$ МГц и $f_{Г2} = 3483$ МГц. Шаг перемещения антенны вибратора $d = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

Напряженность поля определялась по силе тока, измеряемого миллиамперметром.

С целью анализа влияния несинфазности реальных ограниченных излучателей на характер распределения электрического поля (рис. 7) была измерена напряженность электрического поля в отсутствие магнитодиэлектрического слоя для ближнего симметричного квадранта.

На основании анализа распределения напряженности электрического поля построена зависимость коэффициента $\Phi(z)$, определяющего несинфазность по максимуму ДН для $x = 0$ (рис. 8) при значении коэффициента затухания $\alpha = 120$ 1/м.

Видно, что в дальней зоне (при $R > 1,6\lambda$) относительная погрешность, вызванная несинфазностью излучателя, составляет менее 2 %.

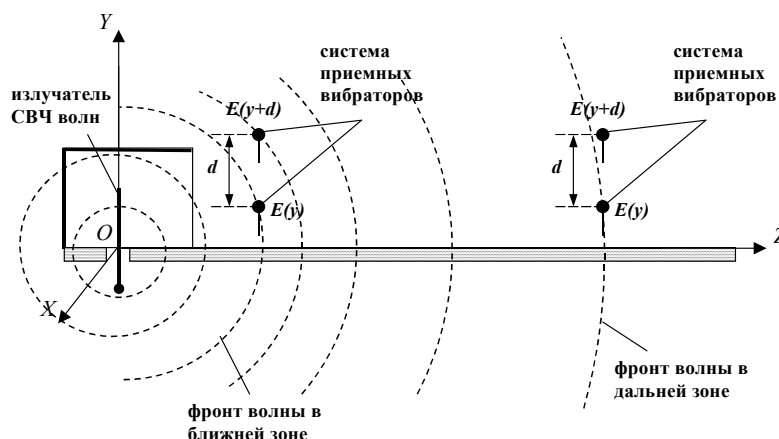


Рис. 7 Распределение напряженности электрического поля

в отсутствии магнитоэлектрического слоя

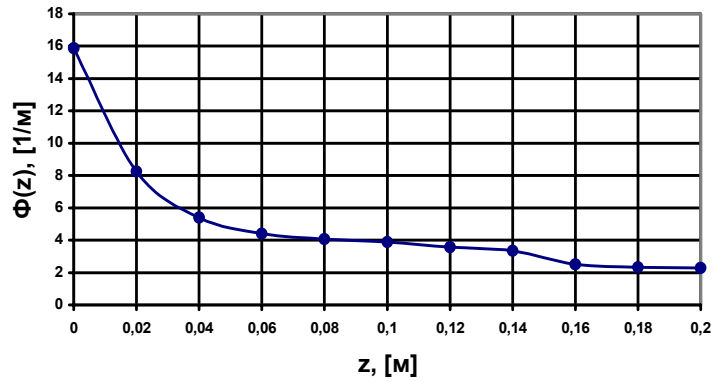


Рис. 8 Зависимость коэффициента несинфазности по максимуму ДН

Следствием ограниченности исследуемой поверхности является смешанный характер распространяемой волны. В этом случае она уже не чисто бегущая, а определяется суммой бегущей и стоячей волн. Это объясняется тем, что у рассматриваемой системы, как разновидности длинной линии (ДЛ), на границах с окружающим пространством не совпадают волновые сопротивления ДЛ $Z_{дл}$ и окружающего воздуха Z_0 . Режим волн оказывается тем ближе к режиму стоячих волн, чем больше указанное несогласование. Однако экспериментально показано, что в ДЗ величина коэффициента затухания α_y не зависит от режима волн.

На рис. 9 показаны теоретическая и экспериментальная зависимости коэффициента затухания от толщины покрытия для материала с $\varepsilon = 2,3$, $\mu = 1$.

Экспериментально подтверждена адекватность расчетных математических зависимостей исследуемому физическому процессу.

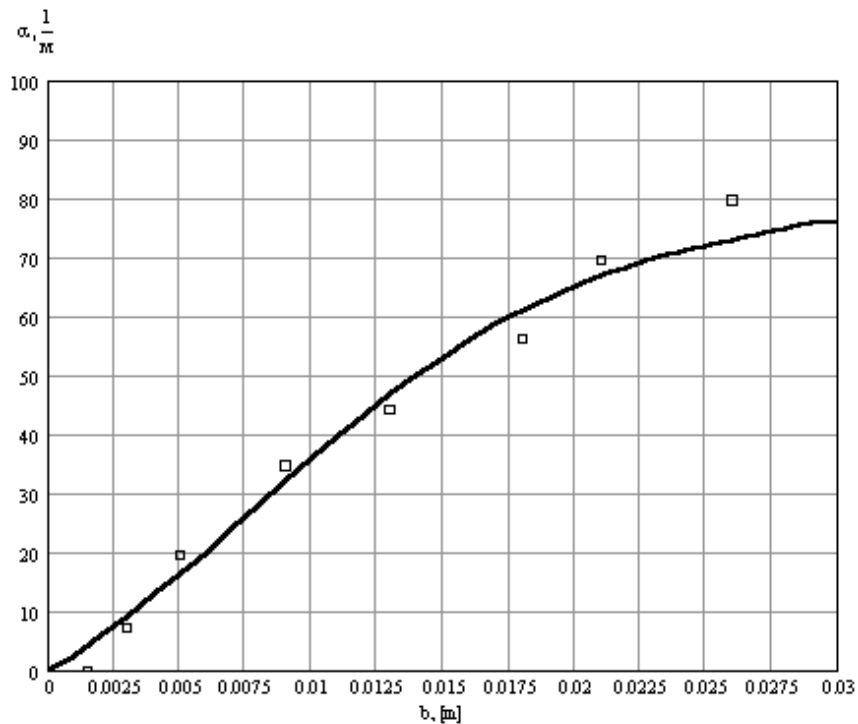


Рис. 9 График зависимости коэффициента затухания от толщины покрытия:
сплошная линия – теоретическая зависимость;
точками показаны экспериментальные значения

На рис. 10 показана структурная схема разработанной измерительно-вычислительной системы (ИВС) поверхностного сканирования толщины и электрофизических параметров магнетодиэлектрических покрытий.

Микропроцессор через блок коммутации частоты генератора СВЧ (ГСВЧ) управляет переключением блока миниклистронных ГСВЧ и сменой апертуры E - и H -мод. Антенна поверхностных волн возбуждает электромагнитное поле внутри контролируемого слоя.

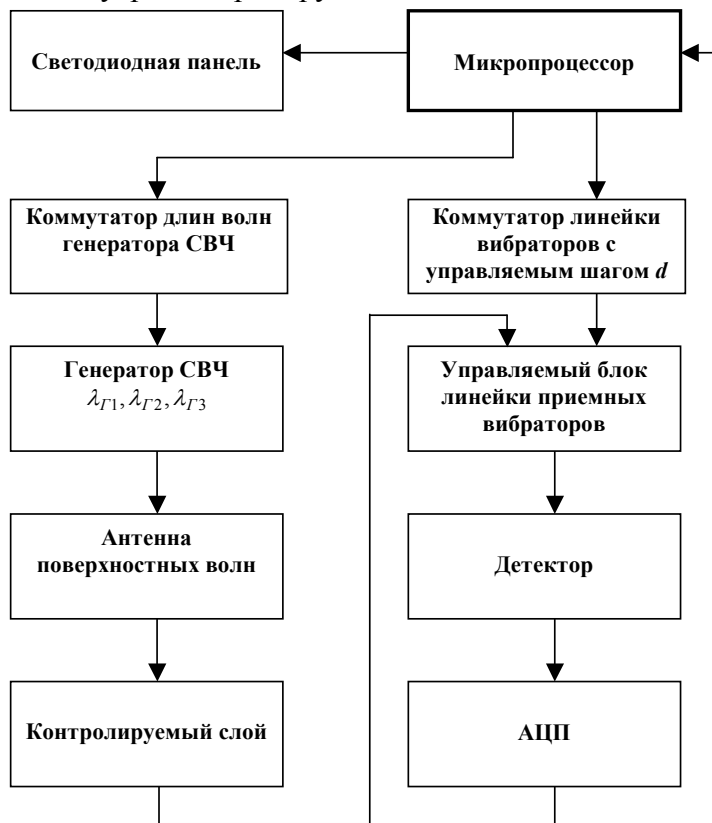


Рис. 10 Структурная схема измерительно-вычислительной системы поверхностного сканирования покрытий

Микропроцессор через коммутатор линейки вибраторов с переменным шагом d управляет герконовым блоком переключений линейки приемных вибраторов. Сигналы с вибраторов через детектор и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) поступают в микропроцессор.

Микропроцессор производит расчет по формулам (4)–(5), решая их в системе. Числовые значения контролируемых параметров выводятся затем на светодиодную панель.

В приложениях приведены: результаты и анализ экспериментальных исследований; материалы сопутствующие основной теме работы; фотографии экспериментальной установки; документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1 Решена краевая задача распространения медленной поверхностной волны над неограниченной системой «магнетодиэлектрик-проводник» и произведена адаптация результатов расчетов к ограниченной системе (для реальных несинфазных излучателей по максимуму их ДН и для специальной круговой апертуры с круговой ДН).

2 Предложен бесконтактный СВЧ метод измерения толщины слоя магнетодиэлектрического покрытия с учетом влияния неконтролируемых параметров: диэлектрической и магнитной относительной проницаемостей, в основе которого лежит явление взаимодействия медленной поверхностной волны со слоем магнетодиэлектрика на металлической поверхности. Метод обладает высоким быстродействием,

локальностью измерения и отсутствием необходимости отстройки величины зазора между датчиком и контролируемой поверхностью.

3 Разработаны излучающие устройства, реализующие предложенный метод, в частности внутренняя электронно-управляемая по максимуму ДН секториальная апертура, обладающая большей мощностью излучения по сравнению с обычной синфазной круговой апертурой. Для разработанных апертур предложен ряд усовершенствований с целью повышения их эффективности.

4 Техническим результатом работы является повышение точности определения толщины покрытия, а также расширение функциональных возможностей (дополнительное определение относительной диэлектрической проницаемости и относительной магнитной проницаемости слоя).

5 Разработана измерительно-вычислительная система, реализующая предложенный метод, и экспериментально подтверждена адекватность расчетных математических зависимостей исследуемому физическому процессу. Погрешность измерения толщины не превышает 5 %.

6 Результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли испытания и рекомендованы к внедрению для служб аналитического контроля.

Личный вклад автора. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, при непосредственном участии автора были разработаны основные идеи метода, получены аналитические выражения и теоретические результаты, предложено математическое и программное обеспечение алгоритмов измерения, проведены эксперименты и осуществлено доказательство достоверности полученных результатов.

Основные материалы, отражающие результаты диссертационной работы, приведены в следующих публикациях:

1 *Федюнин П.А.* Алгоритмы измерения комплекса электромагнитных параметров радиопоглощающих покрытий в диапазоне СВЧ / П.А. Федюнин, Д.В. Карев, С.Р. Каберов // Состояние и проблемы измерений: Тез. докл. 7-й всерос. науч.-техн. конф. / МГТУ им. Баумана. М., 1999. С. 108–109.

2 *Федюнин П.А.* Алгоритмическое обеспечение измерения комплекса параметров гиромангнитных жидкостей в диапазоне СВЧ / П.А. Федюнин, С.А. Алешкин, Д.В. Карев, Д.А. Дмитриев // Тез. докл. 5-й науч.-метод. конф. / ТГТУ. Тамбов, 2000. С. 101.

3 Измерение волнового сопротивления гиротропных противорЛС-покрытий / Д.В. Карев, М.М. Мордасов, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ 14: Тез. докл. междунар. науч. конф. Смоленск, 2001. С. 50–54.

4 *Карев Д.В.* Апертурные системы сканирования волнового сопротивления противорадиолокационных покрытий / Д.В. Карев, Д.А. Дмитриев, П.А. Федюнин // Измерения, контроль, информатизация: Тез. докл. междунар. науч. конф. Барнаул, 2001. С. 70–71.

5 Неразрушающий метод локального определения параметров неоднородностей радиопоглощающих покрытий и материалов / П.А. Федюнин, М.А. Суслин, Д.В. Карев, С.Р. Каберов, Д.А. Дмитриев // Измерения, контроль, информатизация: Тез. докл. междунар. науч. конф. Барнаул, 2001. С. 93–94.

6 *Карев Д.В.* Система измерения теплофизических свойств и волнового сопротивления поглощающих покрытий / Д.В. Карев, С.Р. Каберов, А.В. Никулин // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. Четвертой междунар. теплофиз. шк. / ТГТУ. Тамбов, 2001. С. 55–56.

7 *Карев Д.В.* Метрологические аспекты дифракции неоднородных поверхностных волн в измерениях параметров неоднородностей поглощающих покрытий / Д.В. Карев, С.Р. Каберов, П.А. Федюнин // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. Четвертой междунар. теплофиз. шк. / ТГТУ. Тамбов, 2001. С. 56–58.

8 *Карев Д.В.* Измерительно-вычислительная система поверхностного сканирования модуля волнового сопротивления спиновых согласованных покрытий / Д.В. Карев // Труды ТГТУ. Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2001. Вып. 9. С. 96–100.

9 Пат. 2193184 РФ, МКИ G01 N 15/06. СВЧ способ определения диэлектрической проницаемости и толщины покрытий на металле / М.А. Суслин, Д.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, Д.В. Карев (РФ). 2001102116; Заявл. 23.01.01; Приоритет 23.01.01. 7 с.

10 К проектированию излучающих апертур в системе измерения свойств материалов на поверхностных волнах / П.А. Федюнин, С.Р. Каберов, Д.В. Карев, Д.А. Дмитриев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ 15: Тез. докл. междунар. науч. конф. Тамбов, 2002. С. 48–49.

11 Федюнин П.А. Основы конструирования первичных измерительных преобразователей состава и свойств дисперсных жидких сред на базе волноводной техники / П.А. Федюнин, Д.В. Карев, Д.А. Дмитриев // Сб. науч.-метод. материалов ТВАИИ. Тамбов, 2002. № 16. С. 80–85.

12 Федюнин П.А. Измерение магнитодиэлектрических параметров и толщины спиновых покрытий на металле / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, Д.В. Карев // Сб. науч.-метод. материалов / ТВАИИ. Тамбов, 2002. № 16. С. 92–94.

13 Карев Д.В. Способ измерения толщины поглощающих покрытий / Д.В. Карев, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев // Державинские чтения / ТГУ им. Г.Р. Державина. Тамбов, 2002. С. 55–56.

14 Федюнин П.А. Обоснование технических требований и исследование реализуемости высокочувствительных и высокоточных СВЧ методов сканирования параметров противорадиолокационных покрытий ЛА в процессе нанесения и эксплуатации (итоговый) / П.А. Федюнин, М.А. Суслин, Д.В. Карев и др. // Тема № 20038, шифр «Замедление-99» / ТВАИИ. Тамбов, 2002.