

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

УДК 621.3.087.45

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-5-468-476

Радиоволновой способ контроля неоднородности электрофизических параметров диэлектриков с использованием сканирующей микрополосковой линии

А.А. Баранов^{1,2}, В.А. Сергеев^{1,3}

¹Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия

²АО «Ульяновский механический завод», г. Ульяновск, Россия

³Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия

sva@ulstu.ru

К однородности параметров диэлектриков предъявляются все более жесткие требования, особенно при их использовании в изделиях микро- и нанoeлектроники. В работе представлен автоматизированный способ контроля электрофизических параметров плоских диэлектриков с повышенными требованиями к точности и разрешающей способности. Проведен краткий обзор и сравнительный анализ известных методов контроля параметров твердых диэлектриков. Описан способ СВЧ-контроля неоднородностей параметров плоских диэлектриков по волновым характеристикам сканирующей микрополосковой линии (МПЛ), основанный на применении преобразования Радона. Показано, что наиболее чувствительной к неоднородностям параметров является фазовая характеристика МПЛ. Представлена математическая модель обработки волновых характеристик МПЛ и построения карты распределения неоднородностей параметров. Приведены оценки реализуемости параметров и границы применимости математической модели. Техническая реализация способа рассмотрена на примере установки для контроля однородности параметров плоских диэлектриков и результатов моделирования измерительной части установки в САПР AWR Microwave Office. Проведена оценка методических погрешностей измерения электрофизических параметров диэлектриков описанным способом, которые в случае измерения диэлектрической проницаемости составляют в среднем $\pm 1 \cdot 10^{-4}$, и пространственной разрешающей способности, достигающей по предварительным расчетам 0,2 мм. Описанный способ контроля предназначен для применения при производстве радиоэлектронных изделий с использованием диэлектрических материалов с высокой повторяемостью параметров.

Ключевые слова: плоский диэлектрик; неоднородность параметров; контроль; преобразование Радона; микрополосковая линия; фаза коэффициента передачи

Для цитирования: Баранов А.А., Сергеев В.А. Радиоволновой способ контроля неоднородности электрофизических параметров диэлектриков с использованием сканирующей микрополосковой линии // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 5. – С. 468–476. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-5-468-476

Radio-Wave Method of Controlling Nonhomogeneity of Electrophysical Parameters of Dielectrics Using a Scanning Microstrip Line

A.A. Baranov^{1,2}, V.A. Sergeev^{1,3}

¹*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

²*JSC «Ulyanovsk Mechanical Plant», Ulyanovsk, Russia*

³*Ulyanovsk branch of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia*

sva@ulstu.ru

For homogeneity of parameters of dielectrics more and more rigid requirements are claimed, especially while using them in the micro- and radioelectronic items. The purpose of the work is to develop an automated method for monitoring the electrical parameters of planar dielectrics with increased requirements for accuracy and resolution. A short comparative analysis with the available methods for controlling the parameters of solid dielectrics has been carried out. A method for microwave monitoring of the nonhomogeneities of planar dielectrics by the wave characteristics of a scanning microstrip line (MSL) based on the application of the Radon transform has been described. A mathematical model for processing the MSL wave characteristics and for constructing a map of distributing the nonhomogeneities has been presented. The estimates of realizability of the parameters and the limits of the mathematical model applicability have been given. The technical realization of the method has been considered with an example of the installation for monitoring the uniformity of the parameters of planar dielectrics and the results of simulation of the measuring part in the AWR Microwave Office. The estimation of methodical errors, which in case of the dielectric permittivity measurement is on average $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ and of the resolving power, which reaches 0.2 mm according to preliminary calculations, has been carried out. The described method is applicable in the radio-measuring equipment, used in the field of the microwave technology development, microelectronics, production of composite dielectric materials with high repeatability of parameters.

Keywords: flat dielectric; parameter nonhomogeneity; control; Radon transform; microstrip line; phase of transmission coefficient

For citation: Baranov A.A., Sergeev V.A. Radio-wave method of controlling nonhomogeneity of electrophysical parameters of dielectrics using a scanning microstrip line. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 5, pp. 468–476. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-5-468-476

Введение. В процессе разработки и применения диэлектрических материалов, в том числе композитных, возникает необходимость контроля их электрофизических параметров. Одним из важнейших требований к таким материалам является их однородность. Неоднородности структуры материала и посторонние включения влияют на такие электрофизические параметры материала, как относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, электропроводность и др.

Для контроля параметров диэлектриков широко применяются радиоволновые методы [1, 2], что обусловлено прогрессом в развитии СВЧ измерительной техники. Данные методы являются бесконтактными и неразрушающими и применимы для диэлектриков в любом агрегатном состоянии. Однако большинство практически реализуемых радиоволновых методов контроля параметров диэлектриков, например волноводных, резонаторных, методов «на прохождение» в свободном пространстве и т.д., дают некоторое усредненное по площади контролируемого образца значение электрофизических параметров материала. Применяющиеся в данной области метрологии алгоритмы обработки информации не позволяют получить картину распределения неоднородностей с необходимой точностью и разрешающей способностью. Вместе с тем к однородности параметров диэлектриков предъявляются все более жесткие требования, особенно при их использовании в изделиях микро- и радиоэлектроники [3].

В настоящей работе показана возможность повышения точности и разрешающей способности контроля однородности электрофизических параметров плоских диэлектриков по волновым характеристикам сканирующей микрополосковой линии (МПЛ).

Контроль неоднородностей плоских диэлектриков с использованием сканирующей микрополосковой линии. Данный способ основан на применении преобразования Радона [4], которое является аналогом преобразования Фурье для пространственных функций.

Преобразование Радона (рис.1) достаточно широко применяется при обработке сигнальной информации в рентгеновской и ультразвуковой томографии [5, 6]. Возможность применения этого преобразования для диагностики неоднородностей плоских диэлектриков показана в работах [7, 8].

При измерении параметров выходного сигнала МПЛ вдоль линии l , на которые влияют неоднородности образца диэлектрика, при нескольких положениях МПЛ можно получить одномерную функцию зависимости параметра сигнала от положения

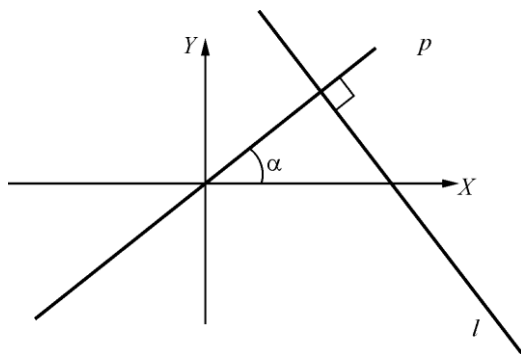


Рис.1. Пояснение к описанию преобразования Радона

Fig.1. An explanation to the description of transformation of Radon

неоднородности $\Theta = f_1(p)$, где p – расстояние от центра вращения, принятого за начало координат, до положения МПЛ. Поворачивая образец и проводя измерение параметра сигнала в новом положении МПЛ, получаем несколько проекций, которые дают функцию, зависящую от угла поворота и расстояния до точки вращения $\Theta = f_1(\alpha, p)$. Для получения двумерной функции распределения неоднородностей, влияющих на измеренный параметр $f_2(\alpha, p)$, применяется обратное преобразование Радона:

$$f_2(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} e^{i\omega(x\cos\alpha + y\sin\alpha)} \tilde{R}(\omega, a) d\omega d\alpha,$$

где

$$\tilde{R}(\omega, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\alpha, p) e^{i\omega p} dp.$$

С целью проверки применимости преобразования Радона для решения поставленной задачи проведено моделирование в среде Scilab. Модель квадратного диэлектрика с неоднородностями в виде изменений контраста заданной формы приведена на рис.2,а. Результат восстановления формы неоднородностей с использованием рассматриваемого метода изображен на рис.2,б. Для восстановления изображения применялся упрощенный метод суммирования отфильтрованных обратных проекций путем наложения 200 различных проекций, полученных при каждом повороте на 5°.

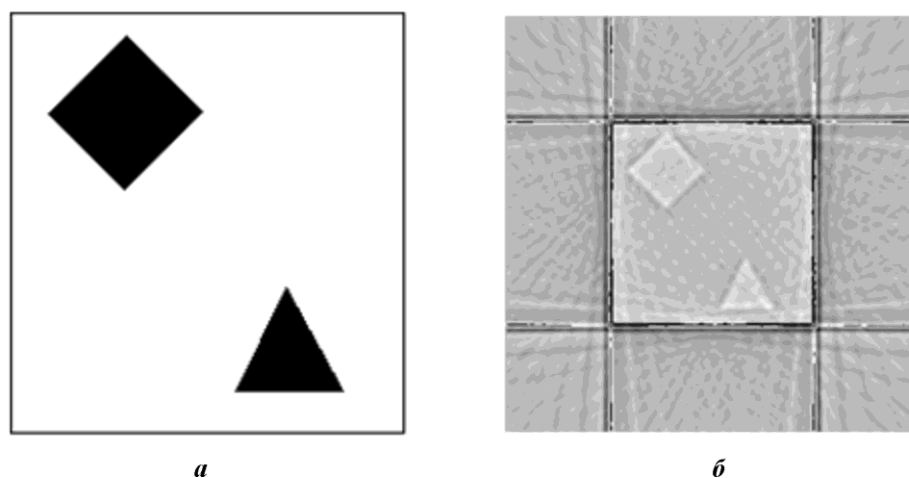


Рис.2. Модель образца диэлектрика с неоднородностями (а) и результат восстановления картины образца (б)

Fig.2. Dielectric sample model with heterogeneity (a) and the restored sample picture (b)

Техническая реализация способа контроля плоских диэлектриков. Структурная схема установки, реализующей способ контроля однородности плоских диэлектриков, показана на рис.3. Установка содержит модуль А4 фазового детектирования и аналого-цифрового преобразования (АЦП), например векторный анализатор цепей R&S ZNB 8, соединенный с полосковым измерителем А3. Полосковый измеритель представляет собой МПЛ, расположенную на подвижной диэлектрической подложке, над которой с минимально малым зазором на вращающейся рамке находится контролируемый образец. Сбор, накопление и обработку данных, а также управление выходными параметрами СВЧ-генератора модуля А4 осуществляет ЭВМ А1 по интерфейсу Ethernet. Одновременно с этим выполняется передача команд управления из ЭВМ А1 на модуль управления А2 посредством интерфейса UART. За прием и обработку команд с ЭВМ отвечает микроконтроллер модуля А2.

Полосковый измеритель перемещается вдоль исследуемого образца с помощью шагового двигателя (ШД) модуля управления А2, и при каждом перемещении проводится очередной замер сдвига фазы коэффициента передачи в МПЛ. При использовании в качестве модуля А4 анализатора цепей R&S ZNB8 осуществляется измерение параметра Phase Unwrap. Затем образец диэлектрика поворачивается на заданный угол с помощью ШД модуля управления А2, и процесс измерения повторяется до построения картины неоднородностей по заданному алгоритму.

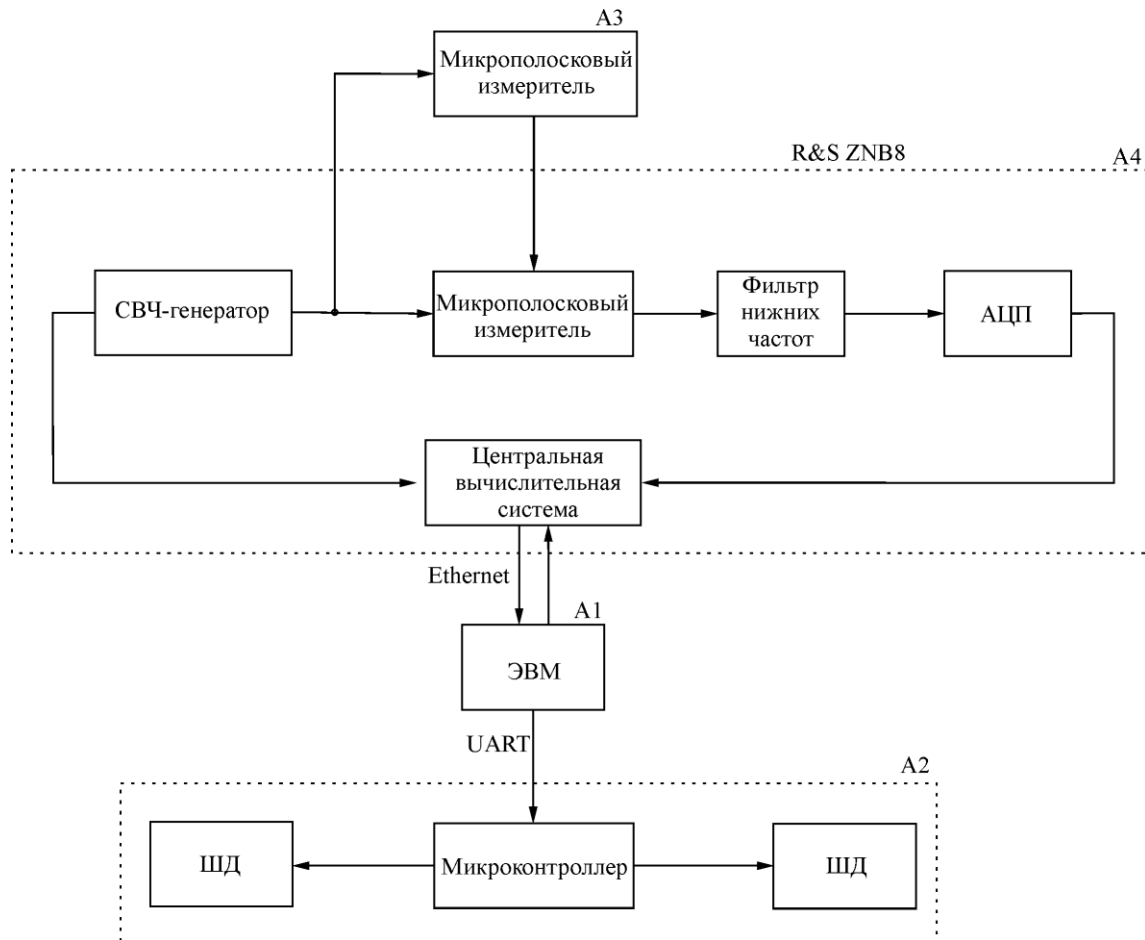


Рис.3. Структурная схема установки для контроля однородности плоских диэлектриков
 Fig.3. The block diagram of installation for control of uniformity of flat dielectrics

С точки зрения электродинамики неоднородность представляет собой включенный последовательно в линию передачи (полосок) отрезок линии передачи с измененными параметрами. Параметрами МПЛ, на которые может повлиять наличие неоднородности, являются коэффициент стоячей волны (КСВ) на входе МПЛ, ее входное сопротивление $R_{вх}$ и фаза коэффициента передачи φ . Для подтверждения возможности выбора $\Delta\varphi$, КСВ либо $R_{вх}$ в качестве контролируемого параметра МПЛ проведено моделирование измерительной части в среде AWR Microwave Office.

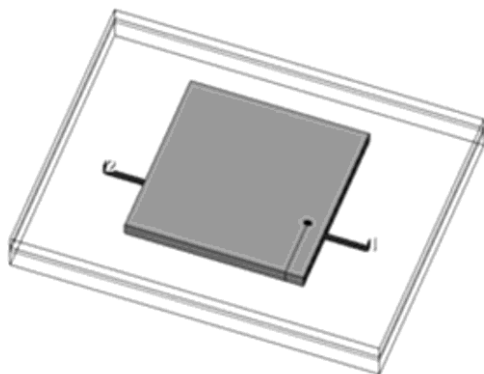


Рис.4. Вид моделируемого объекта и МПЛ
 Fig.4. A type of the modelled object and MSL

Неоднородность моделировалась отверстием с максимальным диаметром $D_{max} = 0,5$ мм в плоском диэлектрике квадратной формы с длиной стороны $L = 30$ мм (рис.4).

В ходе моделирования изменялось как положение неоднородности относительно начала образца, так и ее размер при положении неоднородности в центре образца. На рис.5 приведены полученные в результате моделирования зависимости параметров МПЛ от координаты p при $D = D_{max}$ и от размера D неоднородности при $p/L = 0,5$.

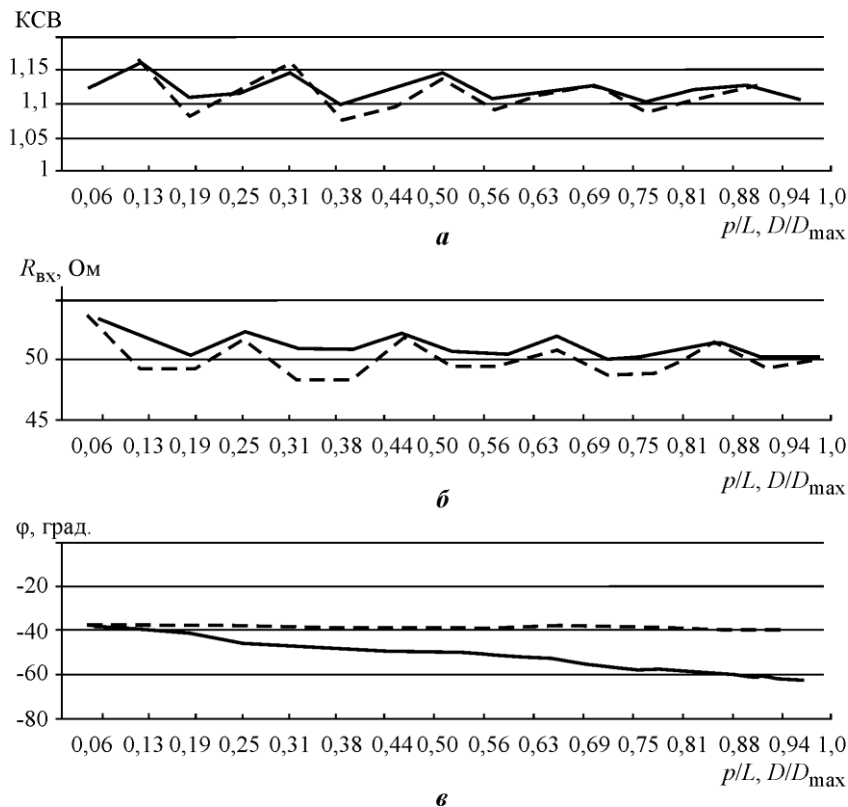


Рис.5. Зависимости параметров МПЛ от координаты p при $D = D_{\max}$ и от размера D неоднородности при $p/L = 0,5$: a – КСВ; b – входное сопротивление; c – фаза коэффициента передачи (--- перемещение неоднородности; — размер неоднородности)
 Fig.5. Dependences of the MSL parameters on p coordinate in case of $D = D_{\max}$ and from the extent D of non-uniformity in case of $p/L = 0,5$: a – standing wave ratio; b – input resistance; c – a transmission ratio phase (--- displacement of nonhomogeneity; — size of nonhomogeneity)

Полученные в ходе моделирования характеристики КСВ и $R_{\text{вх}}$ свидетельствуют об их нелинейной зависимости от размера и положения неоднородности вдоль МПЛ. В случае использования КСВ и $R_{\text{вх}}$ в качестве выходного параметра дополнительно требуется расчет поправок. Этим обусловлена необходимость использования в качестве выходного параметра фазы коэффициента передачи для определения функции $f_1(\alpha, p)$, так как на ее отклонение не влияет положение неоднородности вдоль МПЛ и она линейно зависит от размера неоднородности.

Вносимый фазовый сдвиг $\Delta\varphi_0$ при прохождении электромагнитной волной полоска длиной $l_{\text{п}}$ равен:

$$\Delta\varphi_0 = \beta_0 l_{\text{п}} = 2\pi \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}0}}}{\lambda} l_{\text{п}}, \quad (1)$$

где β_0 – коэффициент фазы однородной МПЛ (диэлектрик однородный); $\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}0}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость однородной МПЛ; λ – длина волны в свободном пространстве.

При наличии в диэлектрике неоднородности электромагнитная волна при прохождении микрополоска той же длины получит дополнительный фазовый сдвиг:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}1}}}{\lambda} l_n,$$

где $\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}1}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость участка МПЛ, находящейся вблизи неоднородности; l_n – участок МПЛ, находящейся вблизи неоднородности [8].

По изменению фазового сдвига можно судить о наличии неоднородности, по дополнительному фазовому сдвигу можно оценить отклонение ε , а положение и размер неоднородности определяются описанным методом. На рис.6 приведены значения фазы коэффициента передачи φ , полученные в результате моделирования для каждого положения МПЛ, перемещаемой вдоль исследуемого образца с шагом 1 мм.

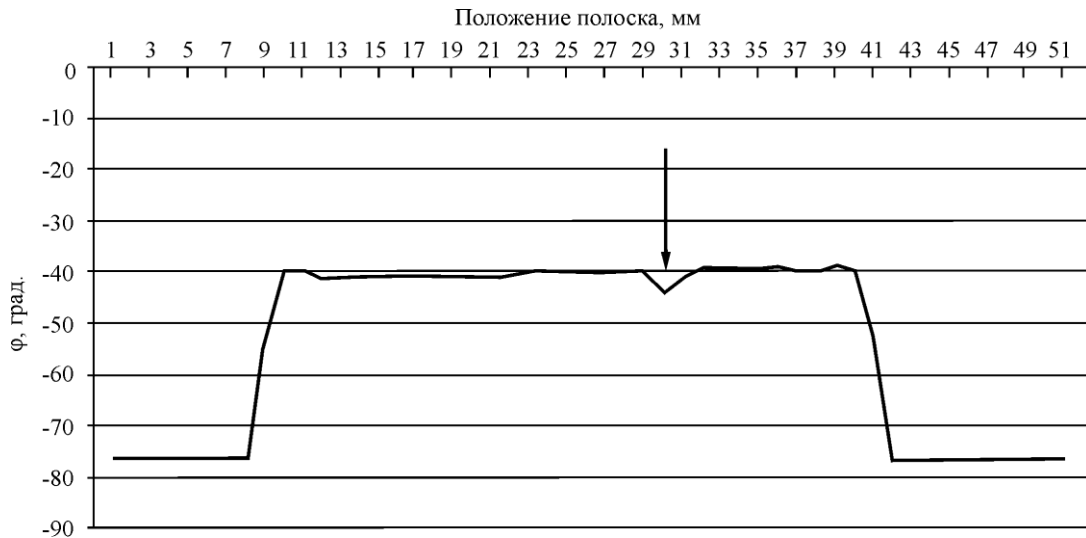


Рис.6. Зависимость фазы φ сигнала МПЛ от положения полоска
 Fig.6. Dependence of value of a phase φ of MSL signal from situation strip

Из результатов моделирования видно изменение значения φ в области неоднородности композитного материала, совпадающей с 30-м шагом МПЛ.

Оценка погрешности и разрешающей способности измерительной части. Разрешающую способность измерительной части можно оценить как шаг измерения аппаратурой сдвига фазы коэффициента передачи МПЛ в соответствии с формулой (1), вносимый изменением $\varepsilon_{\text{эфф}1}$ неоднородности, т.е. чем меньше шаг измерения $\Delta\varphi$, тем меньше $\Delta\varepsilon_{\text{эфф}}$. Разрешающую способность можно оценить и как минимально измеряемый размер неоднородности $l_{\text{нmin}}$ относительно ширины W МПЛ при известном значении $\Delta\varepsilon_{\text{эфф}}$. Из этого следует, что чем выше рабочая частота, тем меньше ширина полоска и выше разрешающая способность установки.

Общее выражение для расчета параметров полосковых линий имеет вид, выраженный через волновое сопротивление Z_0 :

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{\varepsilon_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{8h}{W} + 0,25\frac{W}{h}\right) & \text{при } \left(\frac{W}{h} \leq 1\right), \\ \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W}{h} + 1,444\right)\right]^{-1} & \text{при } \left(\frac{W}{h} \geq 1\right), \end{cases}$$

где $\varepsilon_0 = 120\pi$ – волновое сопротивление свободного пространства; h – толщина диэлектрика [9].

Например, при $h = 2$ мм для неоднородности, равной ширине микрополоска МПЛ, т.е. при $W = l_n \approx 0,2$ мм и изменении диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon$ этой неоднородности, на частоте 10 ГГц получим зависимость, представленную на рис.7. При чувствительности по фазе $0,4^\circ$ и неоднородности диэлектрической проницаемости 0,5 разрешающая способность по координате равна 0,2 мм.

Заключение. Моделирование в среде Scilab показало возможность восстановления картины неоднородности в плоском диэлектрике путем обратного преобразования Радона функции контраста при различной пространственной ориентации полоска. Согласно оценке волновой модели измерительной части наиболее информативным для определения наличия неоднородностей в плоском диэлектрике с применением МПЛ является фаза коэффициента передачи. С помощью предложенной структурной схемы установки можно реализовать способ радиоволнового контроля однородности электрофизических параметров плоских диэлектриков. Пространственная разрешающая способность способа определяется порогом чувствительности измерителя фазы и отклонением диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon$ контролируемого образца в области неоднородности от номинального значения.

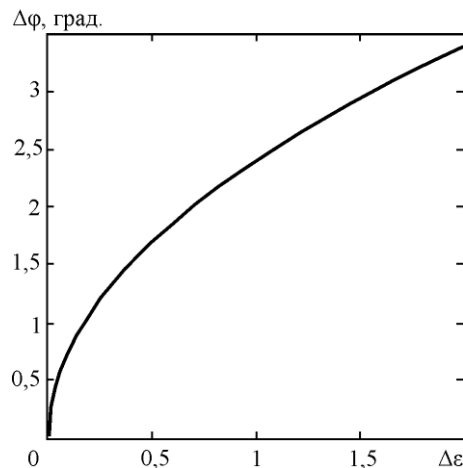


Рис.7. Зависимость изменения фазы сигнала МПЛ $\Delta\varphi$ от неоднородности $\Delta\varepsilon$ диэлектрической проницаемости материала
Fig.7. Dependence of change $\Delta\varphi$ of a phase of MSL signal on value of heterogeneity $\Delta\varepsilon$ dielectric permeability of material

Литература

1. Данилин А. А. Измерения в технике СВЧ: учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2008. – 184 с.
2. Егоров В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 5–38.
3. Microwave electronics measurement and materials characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.K. Neo et al. // New York: John Wiley & Sons, 2004. – 552 p.
4. Хегалсон С. Преобразование Радона. – М.: Мир, 1983. – 148 с.
5. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии: пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – С. 308–318.
6. Лосев Д.В. Преобразование Радона в радиоволновой томографии: методические указания. – Томск: ТомГУ, 2007. – 22 с.
7. Баранов А.А., Анисимов В.Г., Чичулин К.Д. Сканирующий метод контроля неоднородностей плоских диэлектриков // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара (г. Ульяновск, 6–8 декабря 2016 г.). – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 170–172.
8. Баранов А.А., Анисимов В.Г., Чичулин К.Д. Прибор радиоволнового контроля электрофизических параметров плоских композитных структур // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. «INTERMATIC– 2016» (г. Москва, 21–25 ноября 2016 г.). – М.: Галлея-Принт, 2016. – Ч. 4. – С. 91–94.
9. Малорацкий А.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ-элементов на полосковых линиях. – М.: Советское радио, 1972. – 232 с.

Поступила 12.01.2018 г.; принята к публикации 19.06.2018 г.

Баранов Александр Александрович – инженер-конструктор АО «Ульяновский механический завод» (Россия, 432008, г. Ульяновск, Московское шоссе, 94), аспирант кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32), uln-al-bar@yandex.ru.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, профессор, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32), sva@ulstu.ru

References

1. Danilin A.A. *Measurements in microwave technique: studies. manual for universities*. Moscow, Radio Engineering Publ., 2008. 184 p. (In Russian).
2. Egorov V.N. Resonance methods of research of dielectrics at microwave frequencies. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and experimental techniques*, 2007, no. 2, pp. 5–38. (In Russian).
3. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.K. et al. *Microwave electronics measurement and materials characterization*. New York, John Wiley & Sons, 2004. 552 p.
4. Helgason S. *The radon transform*. Moscow, Mir Publ., 1983. 148 p. (In Russian).
5. Herman G. *Image reconstruction for projections: the fundamentals of reconstructive tomography*. Per. with English. Moscow, Mir Publ., 1983, pp. 308–318. (In Russian).
6. Losev D.V. *Radon transformation in radio wave tomography: guidelines*. Tomsk, Tomsk Publ., 2007. 22 p. (In Russian).
7. Baranov A.A., Anisimov V.G., Chichulin K.D. Scanning method of control of flat dielectrics inhomogeneities. *Actual problems of physical and functional electronics: materials of the 19th All-Russian youth scientific school-seminar*. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2016, pp. 170–172. (In Russian).
8. Baranov A.A., Anisimov V.G., Chechulin K.D. Device of radio wave control of electrophysical parameters of flat composite structures. *Fundamental problems of radio-electronic instrument-making: materials Of the international scientific and technical conference «INTERMATIC-2016»*. Moscow, Halley Print Publ., 2016, part 4, pp. 91–94. (In Russian).
9. Maloratsky A.G., Yavich L.R. *Design and calculation of microwave elements on stripline lines*. Moscow, Soviet Radio Publ., 1972. 232 p. (In Russian).

Submitted 12.01.2018; Accepted 19.06.2018.

Information about the authors:

Alexander A. Baranov – Design Engineer, JSC «Ulyanovsk Mechanical Plant» (Russia, 432008, Ulyanovsk, Moskovskoye shosse, 94), PhD student of the Radio Engineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Severny Venetz str., 32), uln-al-bar@yandex.ru

Vyacheslav A. Sergeev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharova str., 48/2), Head of the Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Severny Venetz str., 32), sva@ulstu.ru