

03;06;09;12

Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, М.Ю. Куликов, Д.В. Пономарев

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru; SkripalA_V@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 10 ноября 2009 г.)

Проведено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов пропускания и отражения фотонных кристаллов на основе микрополосковой структуры при наличии нарушения ее периодичности в виде изменения диэлектрической проницаемости подложки одного из чередующихся отрезков микрополосковой линии. Реализована методика измерения параметров материала, который выполняет функцию неоднородности в открытой сверхвысокочастотной фотонной структуре. Получены значения комплексной диэлектрической проницаемости для ряда полярных и неполярных жидкостей.

Введение

Для определения электрофизических параметров диэлектрических и полупроводниковых материалов и структур, нанометровых металлических пленок можно использовать результаты измерений спектров отражения и прохождения взаимодействующего с ними сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения при условии, что известно их теоретическое описание. Нахождение электрофизических параметров связано с необходимостью решать обратную задачу.

Использование открытых СВЧ-линий передачи позволяет сочетать достаточно высокую чувствительность СВЧ-методов измерений с технологичностью изготовления структур и оправок для измерения и отсутствием жестких требований на размеры образцов. К недостаткам измерительных систем на открытых линиях передачи можно отнести наличие потерь на излучение на открытых концах передающих линий, неоднородностях, например, связанных с необходимостью использования коаксиально-микрополосковых переходов, трудности в проведении локальных измерений [1].

Среди различных типов планарных схем микрополосковые являются наиболее часто используемыми в СВЧ-электронике. Микрополосковые схемы достаточно широко используются при реализации СВЧ-методов измерения параметров материалов, в частности, материалов подложек СВЧ-схем.

В последнее время интенсивное развитие нанотехнологий стимулировало появление нового класса периодических структур, получивших название фотонных кристаллов, состоящих из периодически чередующихся слоев, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося электромагнитного излучения. В спектре пропускания такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны — аналог запрещенной зоны в кристаллах. Так же как и в реальных кристаллах, при наличии нарушений периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла могут

появляться узкие „окна“ прозрачности [2–4]. В СВЧ-диапазоне одномерный фотонный кристалл может быть реализован как с помощью волноводов с диэлектрическим заполнением [5,6], так и планарных линий передачи с периодически изменяющейся структурой [7–9].

В связи с высокой чувствительностью частотной зависимости „окон“ прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла к параметрам нарушения периодичности перспективным представляется использование микрополосковых фотонных кристаллов для определения параметров материалов в СВЧ-диапазоне.

В работах [10,11] исследовались одномерные фотонные кристаллы на основе микрополосковой структуры с подложкой из поликора (Al_2O_3), представляющие собой последовательно соединенные чередующиеся отрезки микрополосковой линии передачи с изменяющейся шириной полоскового проводника. Нарушение периодичности фотонного кристалла создавалось уменьшением длины одного из высокоомных (с меньшей шириной полоскового проводника) отрезков микрополосковой линии передачи, что вызывало появление „окна“ прозрачности в запрещенной зоне микрополоскового фотонного кристалла. Изменяемые диэлектрические образцы с фиксированными размерами размещались над этим высокоомным отрезком микрополосковой линии симметрично относительно полоскового проводника, что приводило к частотному сдвигу „окна“ прозрачности. По величине этого сдвига определялась диэлектрическая проницаемость образца. С помощью предложенной схемы затруднительно проводить измерения параметров жидких диэлектриков.

Для определения электрофизических параметров как неполярных, так и полярных жидкостей, обладающих значительной величиной действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне, предлагается использовать в качестве неоднородности фотонной структуры включенный в ее состав отрезок микрополосковой воздушной линии передачи, заполняемый исследуемой жидкостью.

В настоящей работе исследовалась возможность использования микрополосковых фотонных кристаллов для реализации метода измерения параметров жидкостей, которые выполняют функцию нарушения в микрополосковой фотонной структуре, в широком диапазоне изменения их параметров по спектрам отражения и прохождения взаимодействующего с фотонными кристаллами СВЧ-излучения в результате решения соответствующей обратной задачи.

Теоретический анализ

Рассмотрим микрополосковый фотонный кристалл, состоящий из последовательно соединенных отрезков микрополосковой линии передачи с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью подложки.

Четные отрезки реализованы на подложке из поликора (Al_2O_3), а нечетные — в виде отрезков полосковой линии с воздушным заполнением, в которых между полоском и металлическим основанием создан воздушный зазор. Изображение рассматриваемой микрополосковой фотонной структуры приведено на рис. 1.

Для расчета коэффициента пропускания и отражения электромагнитной волны через микрополосковый фотонный кристалл в квазистатическом приближении использовалась матрица передачи \mathbf{T} четырехполосника сложной структуры, представляющего собой каскадное соединение элементарных четырехполосников с известными матрицами передачи, которые имеют вид:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T[1, 1] & T[1, 2] \\ T[2, 1] & T[2, 2] \end{pmatrix} = \mathbf{T}'_N \prod_{i=1}^{N-1} (\mathbf{T}''_{i,i+1} \cdot \mathbf{T}'_i), \quad (1)$$

где \mathbf{T}'_i и $\mathbf{T}''_{i,j}$ — матрицы передачи четырехполосников, описывающих соответственно i -й отрезок и прямое соединение i -го и $(i+1)$ -го отрезков микрополосковой линии передачи.

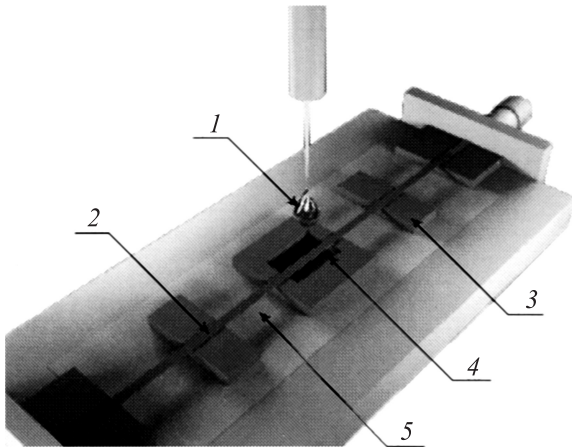


Рис. 1. Микрополосковый фотонный кристалл с кюветой для измерения параметров жидких диэлектриков: 1 — измеряемая жидкость, 2 — полосковый проводник, 3 — поликор, 4 — измерительная кювета, 5 — воздушный зазор.

Выражения для матриц передачи \mathbf{T}'_i и $\mathbf{T}''_{i,j}$ соответствующих элементарных четырехполосников имеют вид [12]:

$$\mathbf{T}'_i = \begin{pmatrix} e^{\gamma_i d_i} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma_i d_i} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{T}''_{i,i+1} = \begin{pmatrix} \frac{r_{i,i+1}+1}{2\sqrt{r_{i,i+1}}} & \frac{r_{i,i+1}-1}{2\sqrt{r_{i,i+1}}} \\ \frac{r_{i,i+1}-1}{2\sqrt{r_{i,i+1}}} & \frac{r_{i,i+1}+1}{2\sqrt{r_{i,i+1}}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь d_i — длина i -го отрезка, γ_i — постоянная распространения электромагнитной волны в i -м отрезке $r_{i,i+1} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i}$, где

$$\rho_i = \frac{377h_i}{\sqrt{\varepsilon_i} W_i (1 + 1.735\varepsilon_i^{-0.0724} (\frac{W_i}{h_i})^{-0.836})}$$

— волновое сопротивление i -го отрезка структуры; ε_i , h_i — диэлектрическая проницаемость и толщина подложки i -го отрезка; W_i — ширина полоскового проводника i -го отрезка.

Коэффициент прохождения СВЧ-мощности определяется через элемент $T[1, 1]$ матрицы передачи \mathbf{T} :

$$D = \frac{1}{|T[1, 1]|^2}. \quad (4)$$

Коэффициент отражения СВЧ-мощности от микрополосковой фотонной структуры определяется квадратом модуля элемента $S[1, 1]$ матрицы рассеяния

$$R = |S[1, 1]|^2, \quad (5)$$

элементы которой связаны с элементами матрицы передачи \mathbf{T} соотношением:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S[1, 1] & S[1, 2] \\ S[2, 1] & S[2, 2] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{T[2, 1]}{T[1, 1]} & \frac{T[1, 1]T[2, 2] - T[1, 2]T[2, 1]}{T[1, 1]} \\ \frac{1}{T[1, 1]} & -\frac{T[1, 2]}{T[1, 1]} \end{pmatrix}.$$

В ходе компьютерного моделирования рассматривалась микрополосковая фотонная структура, состоящая из девяти последовательно соединенных чередующихся отрезков микрополосковой линии передачи с различной диэлектрической проницаемостью подложки (рис. 1).

1, 3, 5, 7 и 9-й отрезки полосковой линии — с воздушным заполнением, 2, 4, 6, 8-й отрезки реализованы на подложке из поликора (Al_2O_3 , диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 9.6$). Ширина полоскового проводника составляла 1 мм, толщина диэлектрической подложки — 1 мм.

В микрополосковую фотонную структуру было введено нарушение путем изменения длины 4, 5 и 6-го отрезков, из которых была сформирована кювета (см. рис. 1) для измерения параметров жидких диэлектриков. Длина 4-го и 6-го отрезков на подложке из поликора составляла 15.5 мм, длина 5-го отрезка с воздушным заполнением, который может заполняться исследуемой жидкостью, выбиралась равной 0.8 мм. Длина 1, 3, 7

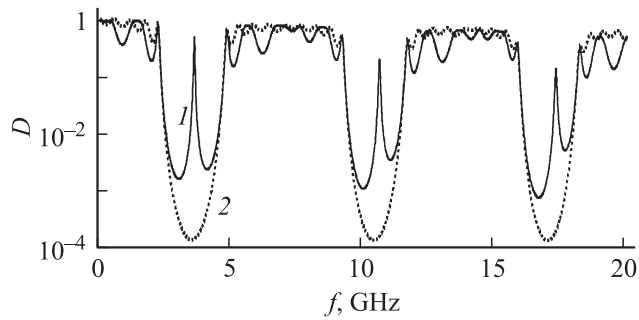


Рис. 2. Расчетные частотные зависимости коэффициента пропускания D микрополосковой фотонной структуры с нарушением периодичности в виде измененной длины 4, 5 и 6-го отрезков (кривая 1) и без нарушения периодичности (кривая 2).

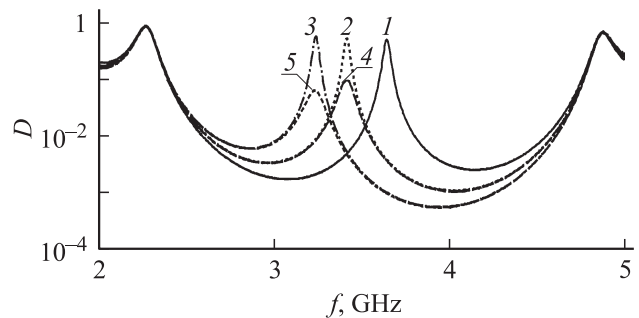


Рис. 3. Расчетные частотные зависимости коэффициента пропускания D микрополосковой фотонной структуры с кюветой, заполненной веществами с различными значениями величины диэлектрической проницаемости ϵ , а.е.: 1 — 1.0 (пустая кювета), 2 — 40, 3 — 80, 4 — $40-5j$, 5 — $80-10j$.

и 9-го отрезков (с воздушным заполнением) фотонного кристалла составляла 20 мм; 2-го и 8-го (на подложке из поликора) — 8 мм. Предполагалось, что сопротивление нагрузки на входе и выходе фотонной структуры составляло 50 Ω .

Расчитанная в квазистатическом приближении частотная зависимость коэффициента пропускания D микрополосковой фотонной структуры, изображенной на рис. 1, в диапазоне частот 0–20 GHz, представлена на рис. 2 (кривая 1), на этом же рисунке приведена частотная зависимость коэффициента пропускания фотонной структуры без нарушения периодичности (кривая 2).

Частотная зависимость характеризуется наличием частотных областей, запрещенных для распространения электромагнитной волны — аналог запрещенной зоны в кристаллах. На частотной зависимости коэффициента пропускания D местоположением „окон“ прозрачности, появление которых вызвано наличием неоднородности в микрополосковой структуре, можно управлять, изменяя параметры этой неоднородности, например, помещая в кювету жидкости с различной диэлектрической проницаемостью.

На рис. 3 приведены расчетные частотные зависимости коэффициента пропускания D микрополосковой фо-

тонной структуры с кюветой, заполненной веществами с различными значениями диэлектрической проницаемости (рис. 1), вблизи „окна“ прозрачности ~ 3.6 GHz в первой запрещенной зоне фотонной структуры.

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены структуры (рис. 4), представляющие собой последовательное соединение чередующихся отрезков микрополосковой линии передачи с различными значениями диэлектрической проницаемости материала подложки, где четные отрезки выполнены на подложке из поликора (Al_2O_3), а нечетные в виде полосковой линии передачи с воздушным заполнением. Длина 1, 3, 7 и 9-го отрезков составляла 20 мм, 2-го и 8-го — 8 мм. Ширина полоскового проводника фотонной структуры составляла 1 мм, толщина диэлектрической подложки — 1 мм.

Для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей из 4, 5 и 6-го отрезков была сформирована кювета, играющая роль неоднородности. Для измерения жидкостей с малыми потерями использовалась широкая кювета (рис. 4, *a*) с размером 4, 5 и 6-го отрезков 15.5, 0.8 и 15.5 мм соответственно. Для жидкостей с высокими потерями — узкая кювета (рис. 4, *b*) с размером 4, 5 и 6-го отрезков 14, 10 и 8 мм.

Измерения частотных зависимостей коэффициента пропускания фотонной структуры с кюветой, заполненной исследуемыми жидкостями, проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A при комнатной температуре. Для подключения к нему исследуемой фотонной структуры использовался коаксиально-микрополосковый переход.

Для определения комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, жидкости, заполняющей кювету, необходимо решить обратную задачу [13,14]. По спектрам пропускания и отражения электромагнитного излучения, обладающим резко выраженной частотной зависимостью, при известном теоретическом

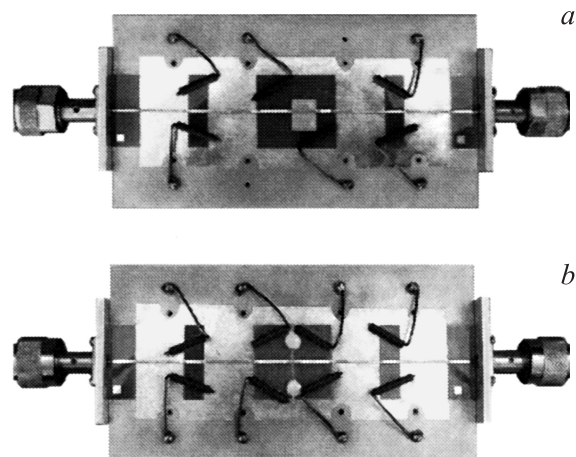


Рис. 4. Экспериментальная микрополосковая фотонная структура: *a* — с широкой кюветой, *b* — с узкой кюветой.

описании этой зависимости такая задача может быть решена с использованием метода наименьших квадратов. При реализации этого метода находится такое значение параметра ε , при котором сумма $S(\varepsilon)$ квадратов разностей экспериментальных D_{exp_n} и расчетных $D(\varepsilon, f_{\text{exp}_n})$ значений квадратов модулей коэффициента пропускания

$$S(\varepsilon) = \sum_n (|D_{\text{exp}_n}|^2 - |D(\varepsilon, f_{\text{exp}_n})|^2)^2 \quad (6)$$

становится минимальной. Искомое значение диэлектрической проницаемости образца определяется численным методом с помощью ЭВМ в результате решения уравнения

$$\frac{\partial S(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial \left[\sum_n (|D_{\text{exp}_n}|^2 - |D(\varepsilon, f_{\text{exp}_n})|^2)^2 \right]}{\partial \varepsilon} = 0. \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение

Экспериментально измерялись значения диэлектрической проницаемости неполярных (толуол, трансформаторное масло, вакуумное масло МВ-5) и полярных жидкостей (деионизованная вода, этанол, глицерин).

На рис. 5 представлены измеренные (пунктир) частотные зависимости коэффициентов пропускания микрополосковой фотонной структуры с неоднородностью (рис. 4, а) в виде пустой кюветы и кюветы, заполненной неполярной жидкостью (трансформаторное масло) (2):

измеренные (пунктир) частотные зависимости коэффициентов пропускания микрополосковой фотонной структуры с неоднородностью (рис. 4, б) в виде пустой кюветы (кривые 1) и кюветы, заполненной полярными жидкостями: деионизованная вода (2), этиловый спирт (3), глицерин (4).

Измеренные частотные зависимости коэффициента пропускания вблизи „окна“ прозрачности микрополосковой фотонной структуры использовались для определения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков, помещенных в кювету, из решения уравнения (7).

На рис. 5 и 6 представлены также частотные зависимости $|D(\varepsilon, f_{\text{exp}_n})|^2$ (сплошные кривые), рассчитанные

Таблица 1.

Неполярные жидкости	ε'	ε''	f_{max} , GHz
Толуол	2.43	0.025	4.06
Трансформаторное масло	2.5	0.026	4.05
Вакуумное масло МВ-5	2.4	0.017	4.06

Таблица 2.

Полярные жидкости	ε'	ε''	f_{max} , GHz
Деионизованная вода	76.6	10.3	3.24
Этанол, X = 96%	10.5	7.9	3.58
Глицерин	16	11.5	3.54

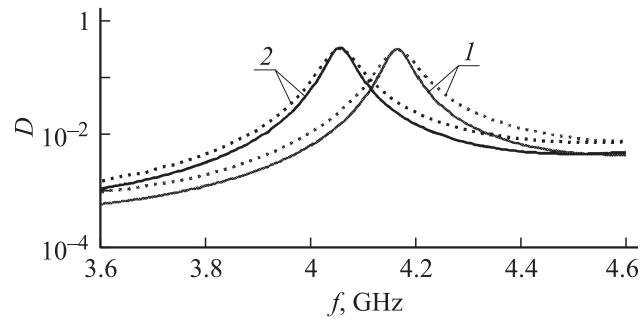


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов пропускания микрополосковой фотонной структуры с неоднородностью (рис. 4, а) в виде пустой кюветы (кривые 1) и кюветы, заполненной неполярной жидкостью (трансформаторное масло) (2): измеренные — пунктир, расчетные — сплошные кривые.

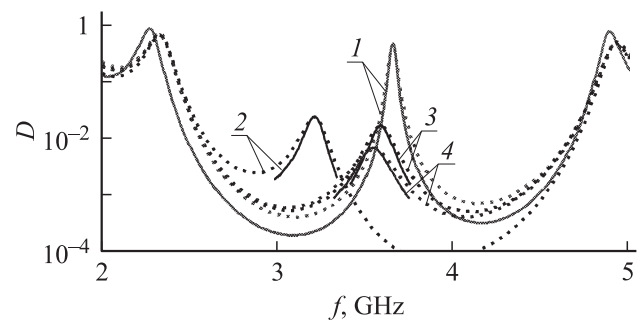


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициентов пропускания микрополосковой фотонной структуры с неоднородностью (рис. 4, б) в виде пустой кюветы (кривые 1) и кюветы, заполненной полярными жидкостями: деионизованная вода (2), этиловый спирт (3), глицерин (4): измеренные — пунктир, расчетные — сплошные кривые.

с использованием соотношения (4) при значениях ε , приведенных в табл. 1 и 2, которые были определены из решения уравнения (7) для ряда исследуемых жидких диэлектриков на частотах f_{max} , соответствующих максимуму коэффициента пропускания $D(\varepsilon, f_{\text{exp}_n})$ в „окне“ прозрачности микрополоскового фотонного кристалла.

Следует отметить: поскольку у полярных жидкостей наблюдается сильная частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon(f)$, корректными являются расчеты частотной зависимости коэффициента пропускания при фиксированном значении ε лишь вблизи частоты f_{max} (см. рис. 6).

Описанная выше методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей с использованием микрополосковой фотонной структуры была использована для измерения широко используемых как в химической и пищевой промышленности, так и в медицине водно-этанольных растворов.

На рис. 7 представлены измеренные вблизи „окна“ прозрачности частотные зависимости коэффициентов пропускания микрополосковой фотонной структуры с неоднородностью (рис. 4, б) в виде кюветы, заполненной водно-этанольным раствором различным объемным содержанием X этанола.

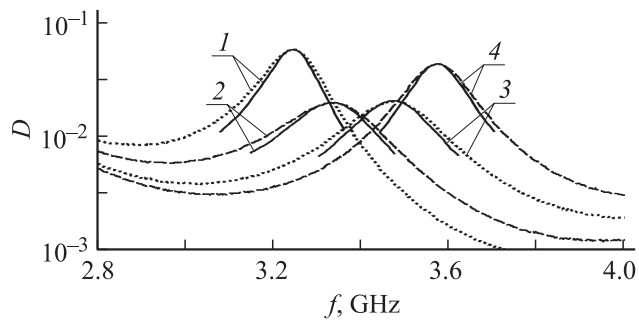


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициентов пропускания микрополосковой фотонной структуры с неоднородностью (рис. 4, б) в виде кюветы, заполненной водно-этанольным раствором с различным объемным содержанием этанола, X : 1 — 0, 2 — 0.38, 3 — 0.67, 4 — 0.96. Измеренные — пунктир, расчетные — сплошные кривые.

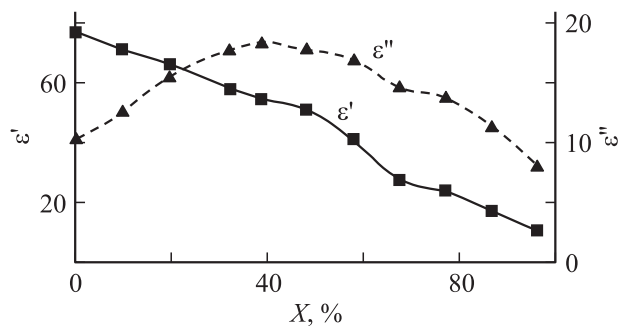


Рис. 8. Экспериментальные зависимости ϵ' и ϵ'' водно-этанольного раствора от объемной доли X этанола в растворе.

Измеренные частотные зависимости коэффициента пропускания (рис. 7) использовались для определения диэлектрической проницаемости водно-этанольных растворов с различным объемным содержанием этанола, заполняющих кювету, из решения уравнения (7).

На рис. 8 представлены также частотные зависимости $|D(\epsilon, f_{\text{exp}})|^2$ (сплошные кривые), рассчитанные с использованием соотношения (4) при значениях ϵ , которые были определены из решения уравнения (7) для водно-этанольных растворов с различным объемным содержанием этанола, на частотах f_{max} , соответствующих максимуму коэффициента пропускания $D(\epsilon, f_{\text{exp}})$ в „окне“ прозрачности микрополоскового фотонного кристалла.

В связи с тем что параметры жидкости определялись в узком частотном диапазоне „окна“ прозрачности (см. рис. 7), изменение ϵ' и ϵ'' с частотой не учитывалось.

Результаты измерений действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей комплексной диэлектрической проницаемости водно-этанольных растворов с различным объемным содержанием этанола представлены на рис. 8.

Как следует из результатов измерений, представленных на рис. 8, с ростом объемной доли X содержания этанола в водном растворе наблюдается монотонное уменьшение действительной части относительной ди-

электрической проницаемости раствора от 76.6 до 10.5. При этом мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости раствора ведет себя немонотонным образом, достигая при объемной доли этанола $\sim 40\%$ значения 18.2, которое существенно превышает значение ϵ'' как для деионизированной воды, так и для растворов этанола 96%.

Следует отметить, что полученные результаты измерений действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей комплексной диэлектрической проницаемости водно-этанольных растворов находятся в хорошем соответствии с результатами разработанной модели для описания спектров диэлектрической проницаемости таких растворов, учитывающей изменение времени релаксации поляризации водно-этанольного раствора с изменением объемной доли этанола [15].

Заключение

Таким образом, реализована методика измерения параметров полярных и неполярных жидкостей, которые выполняют функцию неоднородности в открытой микрополосковой передающей линии, основанная на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания вблизи узкого „окна“ прозрачности. Получены значения диэлектрической проницаемости ряда неполярных и полярных жидкостей с высокими потерями.

Исследованы зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости водно-этанольного раствора от объемной доли этанола X в водном растворе. Установлено, что в отличие от зависимости ϵ' от объемной доли этанола, которая монотонно убывает с ростом X , на зависимости $\epsilon''(X)$ наблюдается отчетливо выраженный максимум при объемной доле этанола, равной 40%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, грантами президента РФ для поддержки молодых российских ученых МК-2205.2008.8 и МК-415.2009.8.

Список литературы

- [1] Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2004. 540 p.
- [2] Yablonoitch E. // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. N 20. P. 2059–2062.
- [3] Yablonoitch E., Gmitter T.J., Meade R.D., Rappe A.M., Brommer K.D., Joannopoulos J.D. // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67. N 24. P. 3380–3383.
- [4] Yoshino K., Ozaki R., Matsumoto J., Ojima M., Hiwatashi Sh., Matsuhiya Y., Ozaki M. // IEEE Transact. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006. Vol. 13. N 3. P. 678–686.
- [5] Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. // IEEE Transact. on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 29. N 2. P. 297–306.

- [6] *Usanov D., Skripal A., Abramov A., Bogolubov A., Skvortsov V., Merdanov M.* // Proc 37rd Europ. Microwave Conf. Munich, Germany, 2007. P. 198–201.
- [7] *Duchamp J.M., Perrier A.L., Ferrari P.* // Proc. 34rd Europ. Microwave Conf. Amsterdam, Netherlands, 2004. Vol. 2. P. 877–880.
- [8] *Tae-Yeoul, Kai Chang* // IEEE Transact. on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49. N 3. P. 549–553.
- [9] *Kee-Ch-S., Kim J.E., Park H.Y., Lim H.* // IEEE Transact. on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol. 47. N 11. P. 2148–2150.
- [10] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю.* // Изв. вузов. Электроника. 2008. № 5. С. 25–32.
- [11] *Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolubov A.S., Kulikov M.Y.* // Proc. 38th Europ. Microwave Conf. Amsterdam, Netherlands, 2008. P. 785–788.
- [12] *Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р.* Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Сов. радио, 1972. 232 с.
- [13] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 112–117.
- [14] *Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolubov A.S., Kalinina A.S.* // Proc. 36rd Europ. Microwave Conf. Manchester, 2006. P. 921–924.
- [15] *Sato N., Buchner R.* // J. Phys. Chem. A. 2003. Vol. 107. P. 4784–4789.