



ФИЗИКА ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.372.826 : 621.317.341.1

Е. В. Беляков

ВЫСОКОДОБОТНЫЙ РЕЗОНАНС В ВОЛНОВОДЕ С СИЛЬНОПОГЛОЩАЮЩИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Описано явление резонансного ослабления СВЧ-сигнала в волноводе сечением $5,2 \times 2,6$ мм, внутри которого в области максимального электрического СВЧ-поля в радиопрозрачной трубке находится поглощающий жидкий диэлектрик. Несмотря на большое значение тангенса угла диэлектрических потерь жидкости (порядка 1), добротность резонанса достигает 300—500. Обнаруженное явление необходимо учитывать при измерениях параметров диэлектриков. Оно может быть использовано для ряда практических целей.

КС: прямоугольный волновод, жидкий диэлектрик, частотная зависимость, СВЧ-резонатор, погрешность измерений, водный раствор, концентрации

Для измерения радиофизических параметров жидких диэлектриков, а также для их облучения в СВЧ-диапазоне используются волноводные кюветы с диэлектрической трубкой, заполненной жидкостью и помещенной в центре прямоугольного волновода перпендикулярно его широким стенкам [1—3].

Такая кювета (рис. 1) проста в изготовлении, удобна в эксплуатации и обеспечивает сильное взаимодействие жидкости с СВЧ-излучением, так как жидкость находится в области максимального электрического поля волны H_{10} в волноводе. Кюветы подобного типа, как правило, применяются для сравнительных измерений коэффициента поглощения жидкостей на фиксированных частотах в предположении, что коэффициент передачи такой кюветы незначительно изменяется во всем диапазоне частот волновода. Как показано ниже, такой подход может приводить к значительным ошибкам измерений.

Кювета в волноводе сечением $5,2 \times 2,6$ мм с тонкостенной тефлоновой трубкой (капилляром) использовалась нами для исследования водных растворов, имеющих высокий коэффициент поглощения (примерно 20 дБ/мм), незначительно изменяющийся в диапазоне частот волновода [4]. При этом обнаружено явление резонансного ослабления

СВЧ-сигнала при определенных значениях внутреннего диаметра капилляра. Частота и добротность такого резонанса зависят от размеров ка-

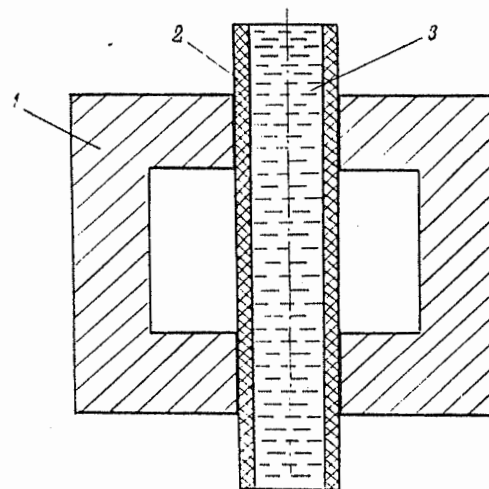


Рис. 1. Конструкция волноводной кюветы (поперечное сечение):

1 — волновод; 2 — диэлектрическая трубка; 3 — исследуемая жидкость

пилляра и от диэлектрической проницаемости жидкости.

Необычность данного явления заключается в высокой добротности резонанса (порядка 300—500), свойственной системам с малыми потерями, в то время как основным элементом данной системы является водный раствор с тангенсом угла потерь порядка 1. Отличительным свойством данного резонансного взаимодействия является также отсутствие заметных частотных зависимостей в отраженном сигнале.

Предварительный анализ позволяет отнести данное явление к одному из типов резонансов волн на поверхности диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости ϵ (у воды действительная часть ϵ составляет около 20, а мнимая часть — около 30)* в прямоугольном волноводе. В данной работе не обсуждаются возможные теоретические модели резонанса, а приводятся экспериментальные данные.

Исследования проводились с помощью панорамного измерителя ослабления и КСВН в диапазоне частот 37—53 ГГц и измерительных волноводных элементов в канале $5,2 \times 2,6$ мм. Мощность

* В данном диапазоне частот.

СВЧ-сигнала при измерениях составляла не более 1 мВт, что вызывало незначительный (не более 1—3° С) нагрев образца в волноводе. Характерный вид резонансного ослабления СВЧ-сигнала в диапазоне

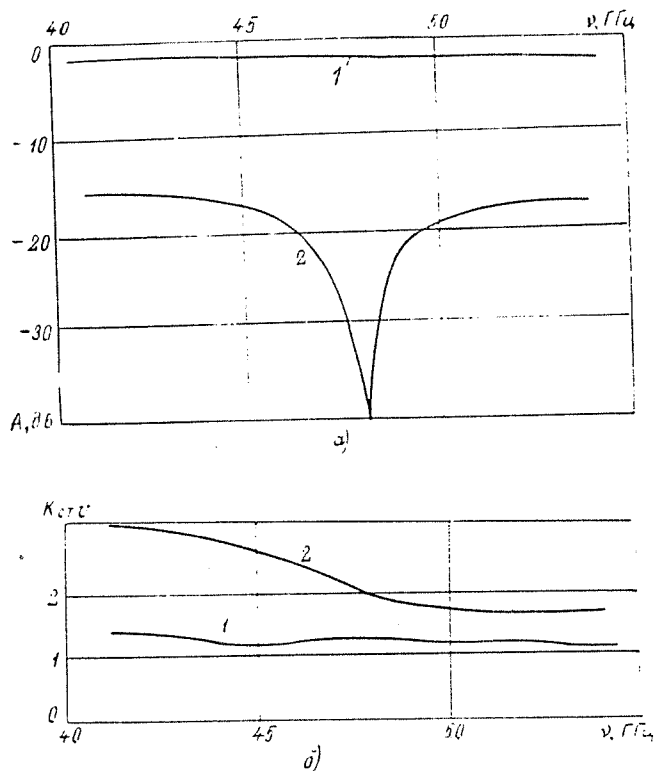


Рис. 2. Вносимые потери (а) и КСВН (б) пустой волноводной кюветы (кривые 1) и кюветы с водой (кривые 2)

частот волновода показан на рис. 2,а (кривая 2). Максимальное ослабление на резонансной частоте при заполнении водой капилляра с внутренним диаметром порядка 1 мм составляет 40—50 дБ. В то же время ослабление в нерезонансных областях диапазона составляет 15 дБ, что примерно соответствует СВЧ-потерям в объеме воды, находящемся внутри волновода [4]. При пустом капилляре данная кювета вносит потери не более 1 дБ во всем диапазоне частот.

На рис. 2,б показана также зависимость КСВН от частоты для кюветы с заполненным водой и с пустым капилляром. Видно, что на резонансной частоте кривые КСВН не имеют существенных особенностей.

В конструкции кюветы были опробованы капилляры из различных диэлектриков с малыми потерями: тефлона, капрона, кварца, полистирола. Внутренний диаметр капилляров составлял 0,5—2 мм при толщине стенки 0,1—0,5 мм. Наиболее высокодобротный резонанс получен при заполнении водой тефлоновых капилляров с толщиной стенки 0,1—0,2 мм. Характерная резонансная зависимость потерь в кювете от внутреннего диаметра капилляра показана на рис. 3.

Исследована зависимость параметров резонанса от диэлектрических свойств различных жидкостей: чистой воды и водных растворов спиртов

различной концентрации, для которых величина как мнимой, так и действительной частей диэлектрической проницаемости примерно обратно пропорциональна концентрации [5]. Измерялись также водные растворы других веществ (диоксида солей, сахаров) с известными диэлектрическими свойствами [5].

Результаты измерений позволяют сделать вывод, что резонанс сдвигается в область более вы-

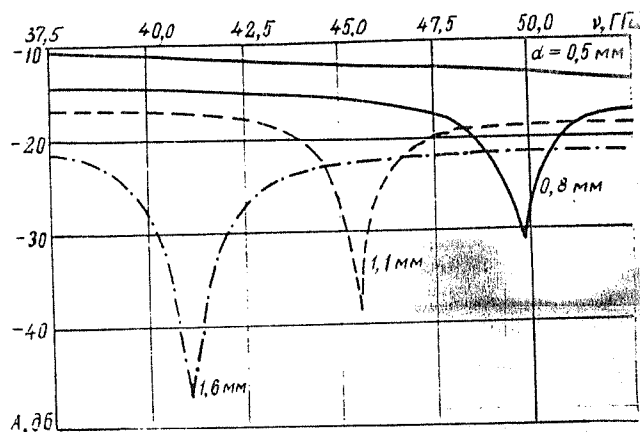


Рис. 3. Ослабление СВЧ-сигнала в волноводной кювете, заполненной водой, при разных внутренних диаметрах капилляра d

соких частот и одновременно уменьшается добротность резонанса при уменьшении диэлектрической проницаемости жидкости ϵ . Обратный эффект наблюдается при увеличении ϵ . Так, например, в слабых растворах таких солей, как KCl и LiCl, имеющих разные знаки гидратации и по-разному влияющих на диэлектрическую проницаемость воды [4] резонанс сдвигается в разные стороны относительно резонанса в чистой воде.

На рис. 4 показана характерная зависимость резонансного ослабления от концентрации водного раствора бутанола. Измерения показали, что даже малые изменения концентрации раствора (в величину менее 1%), которые соответствуют изменению диэлектрической проницаемости раствора такого же порядка [5], вызывают заметные изменения параметров резонансной кривой. Обнаруженные резонансные свойства кювет подобной конструкции следует учитывать при измерении радиофизических параметров жидкостей в СВЧ-диапазоне, так как из-за частотной зависимости коэффициента передачи кюветы измерения на фиксированной частоте могут иметь большую погрешность.

С другой стороны, экспериментально показана высокая чувствительность резонансных характеристик данной капиллярной кюветы к диэлектрическим свойствам растворов, открывает возможность практического применения обнаруженного явления. Так, оно может использоваться для сравнительных измерений диэлектрической проницаемости жидкостей с большими потерями.

* Применение других способов в этих случаях представляет определенные трудности [3, 4].

вует D — оптимальному плану эксперимента [7], то детерминант $D_3(\vec{b})$ будет иметь значение

$$d_2 = \det |D_3(\vec{b})| = \frac{\sigma^6}{108}.$$

В случае многозондовой ИЛ можно показать, что при расположении зондов на расстояниях от измеряемой нагрузки, соответствующих D — оптимальному плану эксперимента, детерминант дисперсионной матрицы (16)

$$d_3 = \det |D_n(\vec{b})| = \frac{\sigma^6}{4n^3}.$$

Поэтому в идеальной многозондовой ИЛ точность оценки коэффициентов b_0, b_1, b_2 растет почти линейно ($\sim [\det |D_n(\vec{b})|]^{-1/3}$) с увеличением числа зондов. В реальных ИЛ существенное увеличение числа зондов потребует учета переотражений от них, так как может не соблюдаться выполнение условия длинной линии.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение числа зондов в измерительной линии и использование метода наименьших квадратов для обработки полученной информации позволяет повысить точность измерения коэффициента отражения СВЧ-двухполюсников. Следует отметить, что этот метод в последние десятилетия получил очень широкое развитие, и существует большое количество пакетов программ математического обеспечения ЭВМ, реализующих обработку измерений с его помощью. Это создает дополнительные удобства при использовании микроЭВМ для автоматического измерения параметров СВЧ-двухполюсников, так как становится возможной организация автоматического контроля ошибок измерения с помощью различных статистических критериев. Кроме того, применение ЭВМ обеспечивает проведение измерений в режиме реального времени. Все это позволяет сделать вывод, что предлагаемый многозондовый метод измерения параметров СВЧ-двухполюсников с использованием микроЭВМ при обработке поступающей информации перспективен для создания автоматических измерителей дм- и см-диапазонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейнин Э. М. Система автоматизации измерительной линии с использованием ЭВМ // Измерительная техника. — 1981. — № 5. — С. 47—49.
2. Бондаренко И. К., Гимпелевич Ю. Б., Царик Ю. И. Автоматический анализатор цепей многоэлементного типа и методы его калибровки // Измерительная техника. — 1985. — № 10. — С. 33—34.
3. Coldecott R. The generalized multiprobe reflectometer and its application to automated transmission line measu-

rements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1973. — Vol. AP-21, No 4. — P. 550—554.

4. А. с. 1133564 СССР. Устройство для измерения модуля и фазы коэффициента отражения в СВЧ-трактах / Ю. Б. Румянцев, А. С. Гайдаров. — Оpubл. в 1985 г., Бюл. № 1.

5. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. — М.: ГИФМЛ, 1958. — 335 с.

6. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез в условиях априорной неопределенности и адаптация информационных систем. — М.: Сов. радио, 1977. — 432 с.

7. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. — М.: Наука, 1971. — 312 с.

Статья поступила 11 августа 1986 г.

УДК 621.385.111

Е. В. Беляков

РЕЗОНАНСНЫЙ КВЧ-ДИЭЛЬКОМЕТР ДЛЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Описан новый способ сравнительных измерений диэлектрической проницаемости жидкостей с большими потерями в КВЧ-диапазоне, основанный на использовании резонанса поверхностных волн в волноводе с образцом. Приведены результаты измерений некоторых водных растворов органических и неорганических веществ. Высокие чувствительность и разрешающая способность ($\Delta \epsilon' \approx 10^{-3} \dots 10^{-4}$) диэлькометра позволяют применять его для исследования структуры водных растворов, а также для различных практических целей (контроля состава и концентрации водных сред).

КС: диэлектрическая проницаемость, КВЧ-диапазон, водный раствор, резонанс, гидратация, концентрация

Метод СВЧ- и КВЧ-диэлькометрии водных растворов успешно используется для исследования структуры растворов и слабых межмолекулярных взаимодействий [1—3]. Данный диапазон соответствует частотам вращательных переходов молекул жидкостей ($\nu_{rot} = 10^9 \dots 10^{12}$ ГГц) и позволяет регистрировать изменения вращательных степеней свободы молекул воды при взаимодействии с растворенными молекулами. Процессы перестройки водородных связей в растворе проявляются в изменении диэлектрической проницаемости раствора и ее частотной дисперсии в СВЧ- и КВЧ-диапазоне. В работах [1, 3, 4] показаны преимущества данного метода при изучении гидратации и комплексообразования в водных растворах химических и биологических препаратов.

Неполное использование возможностей метода КВЧ-диэлькометрии в настоящее время обусловлено отсутствием доступной высокочувствительной измерительной аппаратуры. В то время как методы и приборы для КВЧ-измерений характеристик диэлектриков с малыми потерями разработаны достаточно успешно, проблема исследований таких силь-

поглощающих веществ, как водные растворы ($\text{tg} \delta \approx 1$), представляет определенные трудности [4—6]. Волноводные методы, получившие распространение как наиболее простые и удобные, имеют невысокие чувствительность и разрешающую способность ($\Delta \epsilon \approx 10^{-2}$), а более чувствительные специальные методы с использованием многокамерных кювет, балансных мостов и объемных резонаторов [4, 5] чрезвычайно сложны и дороги.

Указанные трудности можно обойти путем создания резонанса поверхностных волн в волноводе с жидкостью и использования резонансной методик измерения.

В настоящей работе описан основанный на этом принципе КВЧ-диэлькометр с упрощенной измерительной схемой для исследования веществ типа водных растворов, разрешающая способность которого достигает $\Delta \epsilon \approx 10^{-3} \dots 10^{-4}$.

Резонанс поверхностных волн создается в кюветном волноводном устройстве с жидким диэлектриком. Обычно применяемые [4, 7] кюветные устройства для поглощающих жидкостей имеют малый коэффициент заполнения (отношение объемов жидкости и волновода) — такой, чтобы проводить измерения в режиме малых возмущений КВЧ-поля внутри волновода или резонатора. В рассматриваемом диэлькометре использована конструкция кюветы, внутри которой размещен значительный объем жидкости, существенно меняющий распределение КВЧ-поля в волноводе и обеспечивающий резонансное ослабление КВЧ-сигнала за счет возбуждения и резонанса электромагнитных волн на поверхности жидкого диэлектрика в волноводе. Наиболее простая конструкция резонансной проточной кюветы такого типа представляет собой волновод с капилляром, аналогичный «методу цилиндрического стерженька» [7].

Отличительным свойством данной резонансной кюветы является определенное соотношение между размерами капилляра, диапазоном частот и диэлектрической проницаемостью образца. Резонансные свойства такой кюветы экспериментально исследованы в волноводах сечениями $5,2 \times 2,6$ мм* и $7,2 \times 3,4$ мм при диаметрах тонкостенного капилляра из радиопрозрачного диэлектрика ~ 1 мм. Резонансное ослабление КВЧ-сигнала до 50 дБ с добротностью ~ 500 возникает при заполненном водой капилляре. В то же время при пустом капилляре ослабление КВЧ-сигнала незначительно (до 1 дБ) во всем диапазоне частот волновода. Частота и амплитуда резонанса зависят от диэлектрической проницаемости жидкости.

В данной работе не приводится математического анализа резонансного явления, типов поверхностных волн и количественных соотношений между параметрами резонанса и диэлектрическими константами. На данном этапе экспериментально показана возможность создания высокодобротного резонанса в такой системе и существенная зависимость параметров резонанса от диэлектрической проницае-

мости жидкости в капилляре. Ниже приводится методика использования резонанса такого типа для сравнительных измерений водных растворов.

На рис. 1 показаны резонансные кривые ослабления КВЧ-сигнала в кювете капиллярного типа в волноводе сечением $7,2 \times 3,4$ мм, заполненной растворами с различной диэлектрической проницаемостью. В качестве эталонных растворов использовались вод-

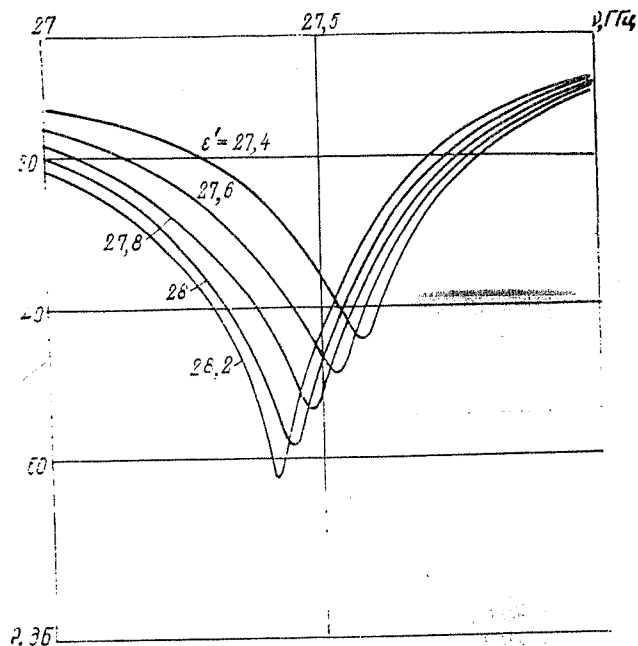


Рис. 1. Зависимость ослабления КВЧ-сигнала в резонансной кювете от диэлектрической проницаемости (ϵ') раствора (вода—изопропанол)

ные растворы спиртов с известными диэлектрическими константами [9]. График, подобный представленному на рис. 1, может быть использован как калибровочный график для количественных измерений диэлектрических свойств неизвестных растворов. Кроме того, для определенных видов измерений в первом приближении можно предположить, что частота резонанса определяется только действительной частью диэлектрической проницаемости (ϵ') раствора.

Структурная схема резонансного диэлькометра может быть выполнена на основе серийного панорамного измерителя КСВН и ослабления в диапазоне 25—37 ГГц (рис. 2). Вследствие значительной амплитуды резонансного ослабления (~ 50 дБ) для расширения динамического диапазона измерений уровня ослабления и повышения чувствительности в схеме применен дополнительный, перестраиваемый по частоте, согласованный детектор 7.

Сравнительные измерения диэлектрической проницаемости слабых водных растворов проводились по амплитуде прошедшего КВЧ-сигнала на резонансной частоте для чистой воды. Для растворов спиртов (этанол, бутанол, изопропанол) показано, что при такой методике изменение концентрации раствора спирта на 0,1% приводит к изменению

* Более подробно результаты исследований и устройство кюветы описаны в [8].

амплитуды выходного сигнала на 5—10%, а минимальное регистрируемое изменение концентрации составляет 0,01—0,05%, что соответствует изменению диэлектрической проницаемости раствора такого же порядка ($\Delta\epsilon/\epsilon = 10^{-4}$) [4, 9].

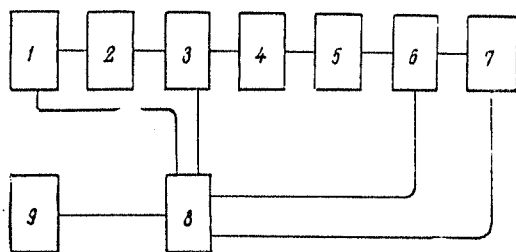


Рис. 2. Структурная схема КВЧ-диэлькометра: 1 — свч-генератор; 2 — аттенуатор; 3, 6 — направленные датчики; 4 — измерительный аттенуатор; 5 — резонансная кювета; 7 — согласованный детектор; 8 — индикатор; 9 — вольтметр

Для измеренных водных растворов гидрофильных и гидрофобных органических веществ (декстраны, сахара, аминокислоты) разрешающая способность диэлькометра по концентрации составляет 0,05—0,1%.

При исследовании водных растворов электролитов — хлоридов металлов с различным знаком гидратации — показана чувствительность резонансного КВЧ-диэлькометра к изменениям внутренней структуры воды в растворах. Так, для всех хлоридов металлов, имеющих «положительный» знак гидратации, т. е. упорядочивающих структуру воды (Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+}), резонанс сдвигается в область высоких частот относительно резонанса для чистой воды, а для хлоридов металлов с «отрицательным» знаком гидратации, разрушающих структуру воды (K^+ , Cs^+ , Rb^+), резонанс сдвигается в область низких частот. Данный эффект гидратации четко проявляется для всех электролитов с концентрацией от 0,1 до 3 Моль. При более высоких концентрациях, видимо, преобладает влияние электропроводности, изменения плотности и других эффектов, общих для всех электролитов.

Таким образом, в результате измерений с модельными химическими растворами установлено, что разработанный КВЧ-диэлькометр позволяет:

1) проводить сравнительные измерения диэлектрической проницаемости поглощающих жидкостей ($\text{tg}\delta=1$) с разрешающей способностью $\Delta\epsilon/\epsilon=10^{-3} \dots 10^{-4}$.

2) непосредственно определять знак и интегральную величину гидратации в слабых водных растворах органических и неорганических веществ;

3) контролировать изменения концентрации водных растворов широкого класса органических веществ с разрешающей способностью 0,01...0,1%.

Проведенные измерения показали хорошие эксплуатационные качества и экономичность диэлькометра. Время измерений и замена образца занимают не более 3 мин при расходе раствора 0,1 мл. При термостабилизации кюветного устройства обеспечивается высокая воспроизводимость результатов.

Конструкция резонансной проточной кюветы и методика измерений по амплитуде выходного сигнала позволяют автоматизировать процесс измерений.

На основе описанного КВЧ-диэлькометра в настоящее время разрабатываются приборы для контроля различных технологических процессов в химическом и фармацевтическом производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Девятков Н. Д. Взаимодействие миллиметрового излучения с биологически активными соединениями и полярными жидкостями // Радиотехника и электроника. — 1978. — Т. 23, № 9. — С. 1982.
2. Исследование гидрофобной гидратации органических соединений методом мм-спектроскопии // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Н. Д. Девятков, О. В. Бецкий, В. А. Завицкий и др. — М.: ИРЭ АН СССР, 1983. — С. 146.
3. Использование мм-спектроскопии для исследования межмолекулярных соединений в растворах // Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Н. Д. Девятков, Ю. И. Хургин, О. В. Бецкий и др. — М.: ИРЭ АН СССР. — 1981. — С. 137.
4. Hallenga K. New method for very sensitive dielectric difference measurements on high-loss liquids at microwave frequencies // Rev. Sci. Instrum. — Dec. 1975. — Vol. 46, No. 12.
5. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. — М.: Физматгиз, 1963.
6. Измерение диэлектриков на СВЧ: обзор по электронной технике. Сер. 1, Электроника СВЧ / Н. А. Алексеева, Н. Г. Солоухина, Г. Х. Ягудин. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1975, вып. 15.
7. Радии Ю. П. Об одном методе измерения диэлектрической проницаемости в сантиметровом диапазоне // Изв. высш. учебн. заведений. Сер. Радиофизика. — 1958. — Т. 1, № 5—6. — С. 177.
8. Беляков Е. В. Высокодобротный резонанс в волновомде с сильнопоглощающим диэлектриком // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. — 1986. — Вып. 9(393). — С. 3—5.
9. Ахатов Я. Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов. — М.: Наука, 1977.

Статья поступила 19 сентября 1986 г.

УДК 621.317:621.385.025

Б. Б. Горбатенко, И. С. Клименко,
В. П. Рябухо, О. В. Серова,
Л. А. Сурменко

ЛАЗЕРНЫЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ РАССТОЯНИЙ ЭВП СВЧ

Разработан лазерный интерферометр, предназначенный для измерения температурных относительных смещений электрода электронной пушки ЭВП СВЧ. Изложена методика измерений и приведены данные метрологического анализа. По-

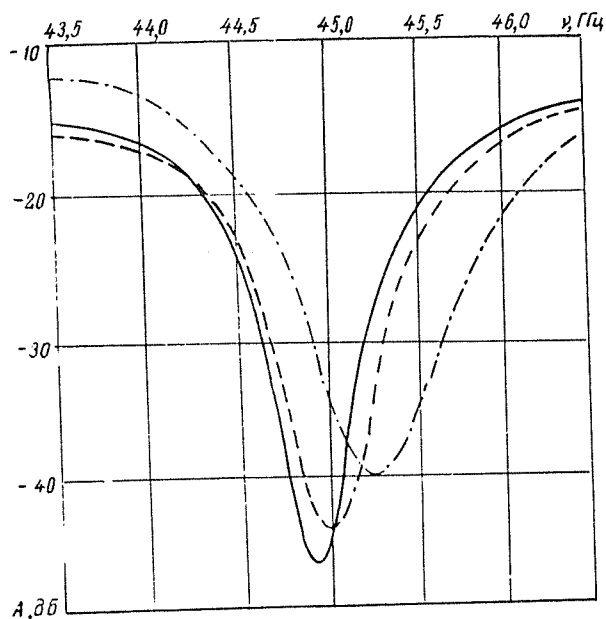


Рис. 4. Резонансное ослабление в кювете с водой (—), с 1%-ным (---) и с 5%-ным (-.-.-) растворами бутанола

также для исследования водных растворов и контроля их состава и концентрации.

Автор выражает благодарность А. М. Храпко и С. В. Белякову за практическую помощь в работе и обсуждение результатов, а также В. А. Кудряшовой за предоставленные химические растворы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии. — Минск: Высшая школа, 1974. — С. 230.
- 2) Радин Ю. П. Об одном методе измерения диэлектрической проницаемости в сантиметровом диапазоне // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. — 1958. — Т. I. — № 5-6. — С. 177-179.
- 3) Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. — М.: Физматгиз, 1963.
- 4) Волноводные и квазиоптические устройства для измерения поглощения СВЧ-излучения в органических жидкостях и растворах биополимеров // А. М. Храпко, В. И. Гайдук, Г. Ф. Бакашина и др. // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. — 1976. — Вып. 10. — С. 69-78.
5. Ахатов Я. Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов. — М.: Наука, 1977.

Статья поступила 16 декабря 1985 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ГАСКАРОВ Д. В., ДАХНОВИЧ А. А. Оптимизация технологических процессов в производстве электронных приборов: Учеб. пособие для студентов вузов спец. «Промышленная электроника». — М.: Высш. шк., 1986. — 191 с., ил.

В книге изложены методологические основы оптимизации технологических процессов производства изделий электронной техники (в том числе процесса испытаний), основы теории планирования эксперимента, рассмотрены регрессионный анализ, ортогональное планирование, метод Бокса-Вильсона, симплекс- и эволюционное планирование, оптимизация свойств многокомпонентных материалов и др.