УДК 621.317.799

А. Ю. ПАНЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МОДУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРЯМОЙ СВЧ ГИГРОМЕТРИИ

Введение

В настоящее время проблема измерения влажности воздуха не имеет решения, которое бы удовлетворяло большинству практических случаев. Поэтому поиск оптимальных решений, которые бы соответствовали многочисленным требованиям идет в различных направлениях. Совершенствуются физические методы: гравиметрический, психрометрический, метод точки росы и прочие. Параллельно идет поиск оптимальных материалов для реализации сорбционных методов, и способов регистрации изменений, которые происходят под действием влаги. Не меньший практический интерес представляют диэлектрометрические методы в СВЧ диапазоне [1]. В ряде случаев им нет альтернативы. Например, при измерениях в атмосфере интерференционный, радиолокационный и радиометрический (радиотепловой) методы позволяют получить информацию о параметрах больших объемов воздушных масс, размеры которых исчисляются километрами или десятками километров [2]. В этом случае полученная информация определяется не только влажностью, но и существенно зависит от давления и распределения температуры. Данные, полученные с помощью СВЧ гигрометров, использующих диэлектрометрический метод и работающих в искусственных условиях, в которых можно контролировать и температуру и давление, определяются только влажностью. Поэтому метод СВЧ гигрометрии можно отнести к прямым [3]. Кроме того, он имеет ряд иных достоинств. К ним относится быстродействие, доступность и дешевизна компонент электронной схемы, возможность контроля параметров потока газа, при этом сенсор можно выполнить так, чтобы он не создавал препятствий движению потока. Однако основной проблемой, препятствующей распространению данного метода, является его низкая чувствительность.

Основные положения

Низкая чувствительность СВЧ гигрометров обусловлена, прежде всего, малой плотностью газов. Вклад в суммарное значение диэлектрической проницаемости поляризованных атомов воды по сравнению с неполярными атомами азота и кислорода велик. Согласно известным результатам исследований, например [4], для атмосферного воздуха при учете трех составляющих: азот, кислород, и водяной пар, значение индекса показателя преломления $N=0{,}5\cdot(\varepsilon-1)\cdot 10^6$, определяется как

$$N=\frac{77{,}6p}{T}+\frac{e_h 3{,}73\cdot 10^5}{T^2}, \qquad (1)$$

где e_h – парциальное давление водяного парам в *гПа*; p – давление в *гПа*; H – относительная влажность, %.

Таким образом, в диапазоне комнатных температур относительный вклад водяного пара примерно на три порядка выше, чем остальных газов. Однако относительная часть водяного пара в общей массе воздуха также невелика. Для температур ниже точки кипения воды максимальное влагосодержание ограничивается насыщающим давлением водяного пара $e_н$, зависящей от температуры (точка росы) [4]:

$$e_н=6{,}105\frac{H}{100}\exp\left[25{,}22\frac{T-273{,}2}{T}-5{,}31\ln\left(\frac{T}{273{,}2}\right)\right]. \qquad (2)$$

Уже при температуре 50 ^{0}С по сравнению со значениями при 15 ^{0}С $e_н$ возрастает с 17 до 125 *гПа*, а N при H=100 % - с 350 до 700, однако это приводит к изменению ε с 1,0007 до 1,0014. Еще меньшие изменения происходят при уменьшении температуры. Так при -10 ^{0}С $e_н$ =2,8 *гПа*, а ε=1,00065. Таким образом, для прямой гигрометрии требуются приборы,

имеющие погрешность измерения отклонения диэлектрической проницаемости от диэлектрической постоянной вакуума порядка $10^{-6} - 10^{-7}$. Такой погрешности можно достичь, используя методы измерений, основанные на применении в качестве сенсоров объемных СВЧ резонаторов.

Физически достоинства резонансных методов обусловлены накоплением энергии сигнала, несущего полезную информацию. Аналогичным свойством обладают модуляционные методы. Накопление энергии сигнала на модулирующей частоте позволяет подавить некоррелированную помеху, а разностный принцип выделения информации – снизить погрешность ухода начальных параметров сенсора [5]. При этом можно исключить ухудшения иных технических и эксплуатационных параметров. Модулирующие устройства, как правило, проще и надежнее самих датчиков, а электронные средства корреляционной обработки сигналов хорошо разработаны. Оптимальный выбор значения модулирующей частоты позволит сохранить требуемое быстродействие, которое реально должно достигать величин порядка 10^{-1} *с*.

Непременным условием реализации модуляционных принципов в прямой СВЧ гигрометрии является воздействие модулирующего влияния непосредственно на один или несколько параметров резонаторного сенсора или исследуемого газа. Модуляция вторичных информационных сигналов улучшает лишь технические характеристики вторичных преобразователей и не увеличивает общего объема измерительной информации.

Эффективность модуляции может быть реализована только в случае известной или контролируемой характеристики преобразования. При этом известный участок должен охватывать возможный диапазон ухода начальных значений. Это требование особенно актуально для СВЧ резонаторов, имеющих высокую добротность, у которых уход резонанс-ной частоты f_p может быть больше полосы пропускания. Сформировать оптимальную характеристику преобразования можно включением диэлектрических вставок в резонирующий объем [6]. В этом случае появляются возможности модуляции параметров вставок. Наиболее перспективным представляется использования вставок из современных искусственных материалов, позволяющих изменять свои электрофизические параметры воздействием внешних полей.

Немаловажным фактором, облегчающим практическую реализацию модуляционных измерений с помощью СВЧ резонаторов, является достигнутый в настоящее время высокий уровень теоретической проработки последних. Это позволяет с высокой степенью достоверности рассчитать параметры измерителей и в ряде случаев исключить весьма затратный этап макетирования. Однако это не относится к модулирующим устройствам, а в ряде случаев и к модуляционным методам. Поэтому основным вопросом является создание методик оценки погрешностей модуляционных измерений, которые были бы столь же адекватны как и теория объемных резонаторов.

Ранее была показана перспективность акустической модуляции плотности воздуха в объемном резонаторе [7] и сделана численная оценка ее вклада в сдвиг резонансной частоты Δf_p при различных видах возбуждения [8]. При этом использованы известные модели, не учитывающие побочных факторов модуляционного воздействия.

Оценка деформационной погрешности и методика ее вычислений

Решение задачи определения f_p основывается на решении задачи о распространении волн в нерегулярном волноводе [9]. Не менее сложной является задача определения погрешности, вызванной деформацией стенок резонатора под действием акустического давления, которая в данном случае рассматривается как неустранимая погрешность. Рассмотрим методику и результаты расчета Δf_p при воздействии продольной звуковой волны типа (00*n*) в цилиндрическом резонаторе. Практически наиболее важной является деформация боковых стенок. Схема сил действующих на участок боковой стенки представлена на рис. 1.

Сечение выбранного участка равно произведению толщины стенки на малый элемент высоты цилиндра: $S=\Delta z\ d$. Угловой размер участка мал, поэтому $\sin\alpha \approx \alpha$. Тогда сила акустиче-

ского давления на участок $F_a = P_a\ R\ \alpha\ \Delta z$, а сила противодействия стенки $F_n = 2\ F_\tau\ \alpha/2$. А величина F_τ определяется упругим растяжением стенки: $F_\tau = E\ S\ \delta r/R$, где E – модуль Юнга. Собирая приведенные выше выражения, получим приращение радиуса:

$$\delta r = P_a \frac{R^2}{Ed}. \qquad (3)$$

Для основных материалов, используемых при создании СВЧ техники, величина модуля Юнга лежит в пределах от 70 *ГПа* – для алюминия, до 220 *ГПа* – для стали. Для меди E=110 *ГПа*. Эти значения будем использовать для дальнейших оценок.

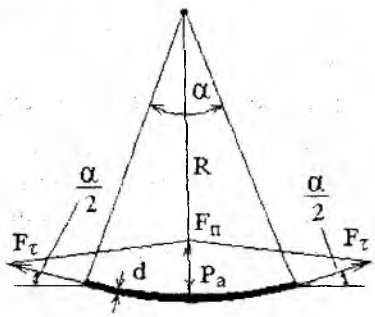

Рис. 1. Деформация боковой стенки резонатора

Для этих же материалов скорость распространения звуковых волн составляет 6,2 *км/с* – для алюминия, 5,85 *км/с* – для стали и 4,7 *км/с* – для меди. Поэтому влиянием распространения звуковой волны вдоль стенок можно пренебречь.

Звуковое давление зависит от мощности источника, его формы и может меняться в широких пределах. Диапазон слышимых звуков соответствует плотности потока мощности от 10^{-12} *Вт·м*$^{-2}$ (порог слышимости), до 10^2 *Вт·м*$^{-2}$ (болевой порог). В специальных концентраторах, создающих сходящиеся пучки ультразвука плотность потока мощности достигает 10 *кВт·см*$^{-2}$.

Будем считать, что в случае газовой среды звуковое давление ограничивает появление нелинейных эффектов. Для коротких отрезков (1–5) λ_a, нелинейность сравнительно слабо проявляется при звуковых давлениях менее (0,01–0,05)P_0, где P_0 – начальное давление газа. При нормальном атмосферном давлении (1013,25 *гПа*) можно считать, что предельное давление в резонаторных измерительных преобразователях (РИП) достигнет 20 *гПа*.

Радиусы РИП могут колебаться в пределах 0,5 *см* для лабораторных измерителей до 1–2 *м* при установке измерителя в сечении технологического или транспортного трубопровода. Также в широких пределах может меняться и P_0, от долей атмосферы в высокодобротных лабораторных устройствах до десятков атмосфер в трубопроводах. Поэтому относительное измерение радиуса РИП при акустическом возмущении ($\delta r/R$) при отношении R/d в пределах 100 можно оценить как $10^{-12} - 10^{-6}$. Эти величины соизмеримы с величиной Δf_p при акустическом возмущении среды [10].

Второй вывод, который следует из представленных выше оценок, состоит в том, что для определения величины погрешности Δf_p достаточно использовать оценку изменения электромагнитного поля (ЭМП), основанную на приближениях первого порядка малости.

Решение задачи оценки изменения продольного размера зависит от ряда конструкционных факторов, учесть которые весьма сложно. Но для уточнения решений можно воспользоваться физически очевидной линейной связью между деформациями боковых и торцевых стенок.

Ввиду малости Δf_p из-за деформации стенок можно считать, что действие этого механизма является аддитивным. Поэтому расчет Δf_p проводился без учета ее изменения из-за модуляции диэлектрической проницаемости заполняющего газа, которое в соответствии с методологией данных измерений несет полезную информацию.

Построение вычислительной процедуры основано на определении относительного изменения положения точки выполнения нулевого граничного условия на металлическом торце резонатора при малых изменениях волнового сопротивления и коэффициента распространения вдоль оси. Поэтому она предполагает получение результата в виде относительного значения $\Delta f / f_0$ как функции от заданных параметров.

Среди входных параметров можно выделить в качестве основного отношение длин волн ЭМП и акустического возмущения. Этот параметр можно определить несколькими способами. Наиболее удобным для представления результатов и дальнейшего проектирования

реальных конструкций является его представление в виде отношения $\lambda_{эz}/\lambda_a$, где $\lambda_{эz}$ – длина волны вдоль оси Z. В этом случае ноль по оси абсцисс соответствует случаю $\lambda_a \to \infty$, то есть тогда, когда давление по всей длине резонатора одинаково.

Следующей величиной для нормировки будем считать изменение радиуса δr. Это обусловлено тем, что при малых изменениях этой величины изменения параметров электромагнитного и акустического полей будут линейными.

Еще одним параметром, влияющим на результирующую погрешность, является пространственное распределение акустического возбуждения относительно квазистационарного электромагнитного поля. При сохранении наглядности результатов ограничим исходные значения этого параметра двумя случаями: первый – случай, когда пучность акустического поля находится в центре резонатора, второй случай – когда в центре находится узел.

Следующим параметром является радиус резонатора, который определяет критическую длину волн ЭМП. Его можно определить косвенно, как отношение $\lambda_э/\lambda_{кр}$, где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны. Наибольшую практическую ценность имеют те моды, которые формируют осесимметричное поле, то есть E_{01} и H_{01}, для них поперечные волновые числа равны v_e=2,404 и v_h=3,833 соответственно для электрических и магнитных волн. Значение радиуса далее представлено в виде отношения $R/\lambda_э$.

Еще одним независимым входным параметром является число волн ЭМП по оси резонатора – n, которое определяет третий индекс в обозначении типа моды ЭМП.

Анализ и обсуждение результатов

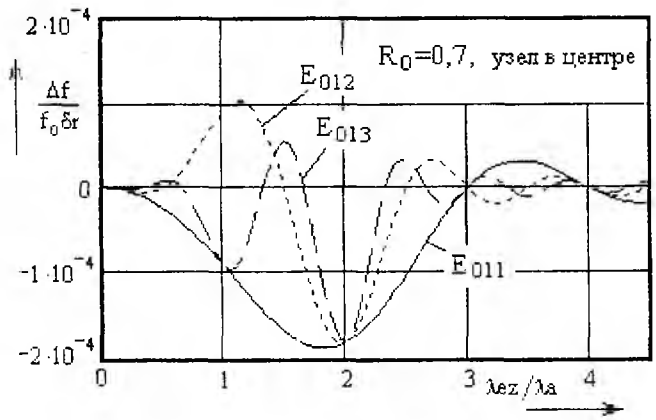

Рис. 2. Сдвиг резонансной частоты на низших модах волн Е-типа

Результаты расчета относительного значения погрешности для первых трех типов волн E-типа при условии узла акустического поля в центре резонатора, показаны на рис. 2. Закономерно, что при $\lambda_a \to \infty$ значение Δf_p =0. Уменьшение сдвига при уменьшении длины акустических волн также закономерно, поскольку в случае существенного укорочения волн их влияние взаимно компенсируется. Максимум погрешности находится в области значений $\lambda_{эz}/\lambda_a \sim 2$. Нужно заметить, что полезный оклик на этих типах волн имеет значительную величину и достигает максимума при несколько большем значении: $\lambda_{эz}/\lambda_a$~2,5 [8]. Поэтому данный тип возбуждения можно рекомендовать для практического использования.

Важным показателем являются зависимости Δf_p при различных значениях радиуса резонатора. Если в случае вычислений полезного значения Δf_p, вызванного модуляцией плотности газа таких зависимостей не наблюдалось, то в случае изменения волнового сопротивления и коэффициента распространения волн при изменении радиуса резонатора такая зависимость должна быть существенной. Для первых трех типов волн E-типа, также при условии узла акустического поля в центре резонатора, они показаны на рис. 3.

Для каждого из выбранных значений радиуса резонатора (0,45, 0,7, и 1,5) значения отношений $\lambda/\lambda_{кр}$ соответственно 0,85, 0,55 и 0,26. Для того чтобы изобразить эти зависимости на одном рисунке, масштаб графиков пришлось существенно изменить, для первого и последнего значения изменение составляет 10^3 раз.

Данный результат обусловлен резким увеличением зависимости волнового сопротивления и коэффициента распространения волн при $\lambda \to \lambda_{кр}$. Этот результат также является физически объяснимым и важным при построении реальных измерителей. По результатам этого расчета можно сказать, что необходимо выбирать радиальный размер резонатора таким

образом, чтобы погрешность, обусловленная этим фактором, не превышала уровень остальных систематических и аппаратурных погрешностей. Однако на стадии предварительного анализа невозможно определить, является ли это условие практически осуществимым.

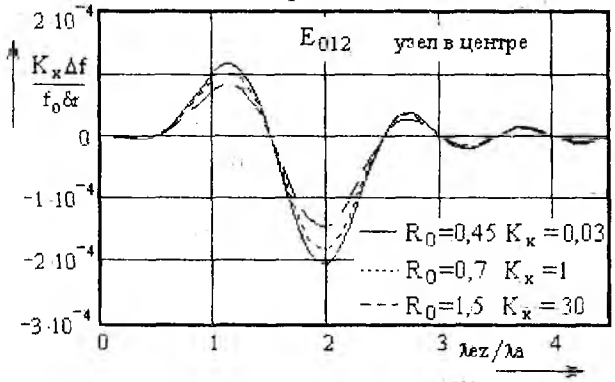

Рис. 3. Сдвиг резонансной частоты при различных $\lambda_э/\lambda_{кр}$

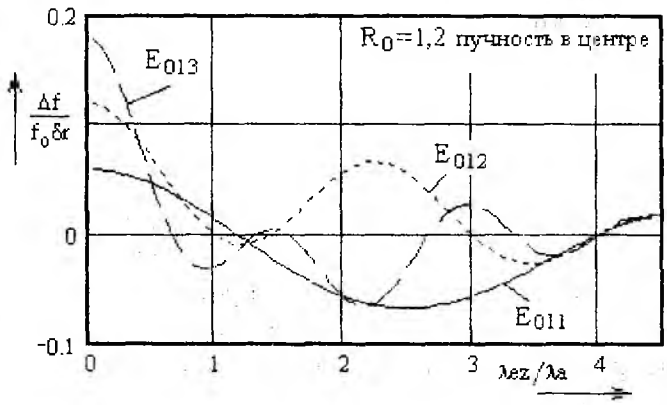

Рис. 4. Сдвиг резонансной частоты при пучности возмущения в центре резонатора

Следующим практически полезным вариантом взаимного положения волн ЭМП и акустической модуляции является случай, при котором в центре резонатора находится пучность звукового давления. Результаты расчета поведения относительной погрешности в этом случае для тех же значений n представлены на рис. 4

Для этого случая общая величина вклада существенно больше, чем в случае расположения узла акустического поля в центре. Физически закономерным является сравнительно большое значение погрешности в нуле и его дальнейшее осциллирующее уменьшение по мере длины волны акустической модуляции.

Учитывая общее соотношение между величиной полезного сигнала [8] и результатами данного расчета можно делать вывод, что более привлекательными для практической реализации является первый случай. Однако достоинством данного случая является возможность использования изменения положения торцевых стенок для компенсации данного вида погрешности. При расположении пучности в центре давление на торцевые стенки приходится в фазе. То есть общая длина осевого размера резонатора будет изменяться в отличие от расположения в центре резонатора узла акустического поля. В частности (рис. 4), при больших λ_a давление на торцевые стенки будет увеличивать осевой размер резонатора, что приведет к уменьшению f_p, поэтому при определенном подборе механических свойств торцов, это взаимосвязь может быть использована для компенсации погрешности.

Результаты расчета погрешности для первых трех мод волн *H*-типа показаны на рис. 5.

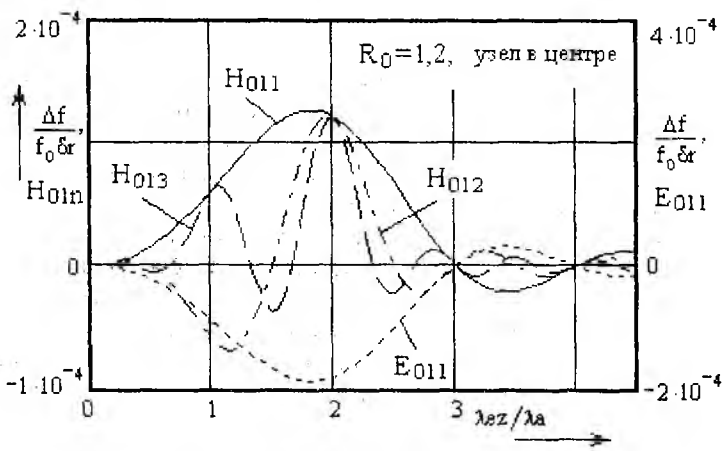

Рис. 5. Сдвиг резонансной частоты для волн Н-типа

Для выбранного значения радиуса резонатора (R_0=1, 2) значение отношения $\lambda/\lambda_{кр}$ равно 0,51. Для сравнения показано поведение погрешности для волны Е-типа на моде E_{011}, при R_0=0,7, как на рис. 3. Масштаб ее изображения изменен в два раза. Закономерным является изменение знака погрешности. Это обусловлено тем, что изменение волнового сопротивления в зависимости от радиуса для волн Е- и Н-типов противоположно. Этот вариант использования модуляционных измерений наименее привлекателен, поскольку чувствительность по основному информационному сигналу наиболее низкая [8].

Поведение Δf_p для случая, когда в центре резонатора расположена пучность акустического поля, представлено на рис. 6.

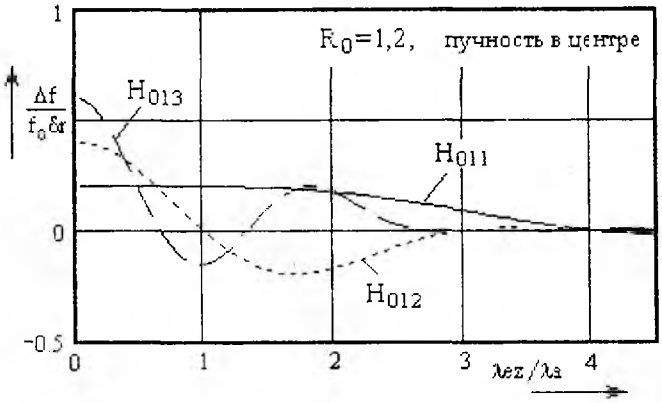

Рис. 6. Сдвиг резонансной частоты на низших модах волн Н-типа

Необходимо отметить, что увеличение длины резонатора (возрастание индекса n) приводит к закономерному увеличению чувствительности как по основному сигналу [8], так и по величине погрешности. Можно отметить, что в основном погрешность и чувствительность для волн Е- и Н-типов при расположении пучности в центре имеют один порядок. Также как и для волн Е-типа, в этом случае возможна компенсация изменением положения торцов.

При необходимости использовать волны *Н*-типа этот случай более предпочтителен.

Кроме представленных расчетных зависимостей были рассмотрены и другие, в частности зависимости Δf_p при различных R_0 в случае расположения в центре резонатора пучности акустического поля. Эти результаты также могут быть полезными при проектировании реальных устройств.

Выводы

Часть выводов представлена при анализе данных расчета. Среди других нужно выделить следующие. Существует ряд мер, которые позволят ослабить действие этого источника погрешностей. К ним можно отнести более глубокий анализ динамических процессов механических частях резонатора, сопоставление и анализ взаимодействия ЭМП и распределений механических нагрузок, с целью поиска компенсирующих эффектов. Далее, в конструкции РИП желательно предусмотреть датчики деформаций стенок. Теоретическая задача достаточно сложна, и в работе удалось создать и проанализировать модели только некоторых физических механизмов. Для окончательного решения нужна экспериментальная отработка конструкций.

Работа показала возможность существенного ослабления данного специфического источника погрешности, что увеличивает перспективность использования модуляционного воздействия при измерении параметров газовой среды в объемных РИП СВЧ диапазона и техническую реализуемость этого метода.

Список литературы: 1. *Лисовский В. В.* Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Минск: УОБГАТУ, 2005. 292с. 2. *Михайлов Н.Ф., Рыжиков А. В., Щукин Г. Г.* Радиометеорологические исследования над морем Л.: Гидрометеоиздат. 1990. 207с. 3. *Гордиенко Ю. Е., Слипченко Н. И., Пашков А. В.* Развитие прямого СВЧ диэлектрического метода гигрометрии // Радиотехника. 2003. №135. С. 206–210. 4. *Wayne L. Patterson* Advanced Refractive Effects Prediction System. SSC San Diego. CA 92152-5001. January 2000. 5. *Головко Д.Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П.* Модуляційні НВЧ-вимірювачі електричних та неелектричних величин. К.: МП Леся, 2001. 232с. 6. *Гордиенко Ю.Е., Пашков А.В., Слипченко Н.И., Рябухи А.А.* Электродинамическое моделирование СВЧ резонаторных сенсоров для гигрометрии газов / Ю.Е. Гордиенко // Радиотехника. 2002. № 129. С. 115-118. 7. *Панченко А.Ю.* Оценка возможности комплексного использования акустических и электромагнитных волн для оценки параметров веществ в закрытых объемах // Радиоэлектроника и информатика. 1997. № 1. С.19-20. 8. *Panchenko A. Yu.* Determining the Frequency Shifts of Resonance Cavities that Result from Acoustic Disturbance of the Filling Medium // Telecommunications and Radio Engineering. Begell Hous, Inc., New York, NY, (USA). 2002. Vol.57, N4. P.18–22. 9. *Фелсен Л., Маркувиц Н.* Излучение и рассеяние волн. Т. 1. М.: Мир, 1978. 547 с. 10. *Панченко А. Ю.* Оценка чувствительности резонаторных измерительных СВЧ-преобразователей при акустическом возмущении заполняющей среды // Радиоэлектроника и информатика. 2001. № 3. С.17-20.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.11.2009