

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Ю. Г. МАКЕЕВ, А. П. МОТОРНЕНКО

Рассмотрена методика неразрушающего локального определения диэлектрических проницаемостей веществ, основанная на резонансных особенностях собственных поляризационно-вырожденных электромагнитных колебаний HE-типа в структуре, представляющей ортогональное пересечение запердельных цилиндрического и радиального волноводов. Образец изотропного или анизотропного диэлектрика в виде пластины произвольной формы и размеров помещался в область пересечения волноводов и частично в радиальный волновод. Приведены измеренные данным методом в диапазоне частот 10...70 ГГц значения диэлектрических проницаемостей фторопласта-4, плавленого и монокристаллического кварца.

The paper deals with a procedure of non-destructive local determination of dielectric constants of materials, based on resonance features of the inherent polarization-deteriorated electromagnetic oscillations of HE-type in a structure that is an orthogonal intersection of out-of-limit cylindrical and radial wave guides. A sample of an isotropic and anisotropic dielectric in the form of a plate of an arbitrary shape was placed into an area of wave guides intersection and partially into the radial wave guide. Values of dielectric constants of fluoro-plastic-4, fused and single-crystal quartz, measured by this method in the frequency range of 10 to 70 Hz, are given.

Введение. Исследование диэлектрических свойств различных материалов в широком частотном диапазоне имеет большое научное и практическое значение. Это обусловлено тем, что комплексная диэлектрическая проницаемость отражает структурные свойства, а также динамические особенности вещества в разных физических условиях. В последнее время наблюдается повышенный интерес к развитию и использованию радиофизических методов измерения диэлектрических параметров веществ, в частности, в микроволновом диапазоне, что обусловлено по крайней мере тремя обстоятельствами.

Во-первых, появился целый ряд новых диэлектрических и полупроводниковых материалов, в связи с чем возникла необходимость выяснения возможностей их использования при разработке новой элементной базы в микроминиатюрном исполнении для радиоэлектронной и вычислительной техники. Развитие пленочной технологии потребовало изготовления высококачественных диэлектрических подложек с заданными параметрами.

Во-вторых, было обнаружено влияние нетеплового электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на функциональные возможности живых организмов, что вызвало целый поток новых публикаций [1]. Использование диэлектromетрии в миллиметровом диапазоне при изучении биосистем показало уникальную возможность выявления их структурных и функциональных особенностей в связи с заметным различием диэлектрической проницаемости биополимера, связанной и свободной воды [2, 3].

В-третьих, микроволновые методы позволяют изучать не только параметры изотропных диэлектрических материалов, но и характеристики анизотропных монокристаллических образцов, что является инструментом для изучения особенностей кристаллов и расширяет возможности их практического использования. Вместе с тем работ, посвященных микроволновым методам измерения электрических характеристик анизотропных диэлектриков, не так уж и много [4–9].

В настоящей работе представлена методика неразрушающего определения электрических параметров изотропных и анизотропных образцов диэлектриков, являющаяся развитием исследований, изложенных в [4–6]. В отличие от представленной в [4] она обеспечивает проведе-

ние неразрушающих измерений и контроль параметров диэлектрических материалов. От описанных в [5, 6] данная методика отличается более высокой точностью за счет использования результатов строгого решения соответствующей электродинамической задачи [10].

Методика исследований. Рассматриваемый метод определения электрических характеристик изотропных и анизотропных диэлектриков в микроволновом диапазоне относится к резонансным методам и основан на использовании собственных поляризационно-вырожденных электромагнитных колебаний HE₁₁₈-типа в резонаторе. Последний представляет (рис. 1, а) ортогональное пересечение запердельных цилиндрического 1 и радиального 2 волноводов с исследуемым диэлектрическим элементом (ДЭ) 3 в области пересечения волноводов и частично — области радиального волновода. На рис. 1, а ДЭ 3 показан в виде параллелепипеда, однако пластина исследуемого диэлектрика может быть любой плоской конфигурации. После возбуждения в такой резонансной структуре, например, собственного HE₁₁₈-колебания происходит снятие вырождения, и в случае однородного изотропного диэлектрического образца резонирующее электромагнитное колебание происходит на одной частоте, зависящей от геометрических размеров резонатора и диэлектрической проницаемости ДЭ. Если диэлектрик не однороден или анизотропен, то возникает два собственных ортогональных колебания HE₁₁₈¹ и HE₁₁₈², в плоскостях поляризации которых расположены направления наибольшего и наименьшего значений диэлектрической проницаемости образца.

В работе [4] для измерения параметров анизотропно-го диэлектрика использовали резонансную структуру на основе волноводно-диэлектрического резонатора (ВДР) с запердельным волноводом. В качестве измерительного ВДР (рис. 1, б) применяли отрезок запердельного цилиндрического волновода 1, частично заполненный ис-

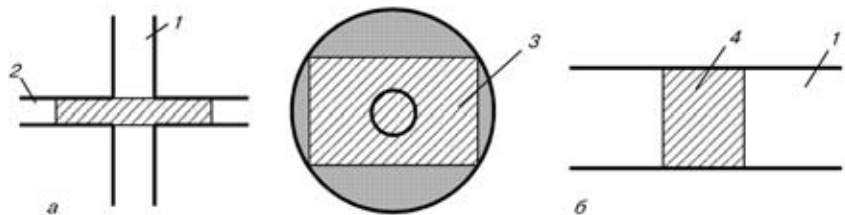


Рис. 1. Схематическое изображение измерительных резонаторов (обозначения см. в тексте)



следуемым ДЭ в виде тонкого диска 4 с диаметром, равным внутреннему диаметру волновода. Возможная эллиптичность диэлектрического диска, а также неизбежный зазор между ДЭ и внутренними стенками волновода вносят дополнительные погрешности в определение электрических параметров образца описанным ранее методом. Предложенный в настоящей работе метод исключает такие погрешности и, кроме того, позволяет проводить дополнительно локальные топографические измерения электрических параметров исследуемого диэлектрика в виде пластины вдоль ее поверхности. Единственным требованием к поперечным размерам диэлектрического образца в этом случае является условие, чтобы диаметр пятна электромагнитного поля, занимающего часть ДЭ, был меньше его минимального поперечного размера. С учетом заурядности волноводов и возможности выбора цилиндрического волновода с малым внутренним диаметром это условие достаточно легко выполнимо на практике даже для сравнительно небольших образцов.

Спектр собственных НЕ-электромагнитных колебаний в резонаторе, изображенном схематически на рис. 1, a , достаточно подробно изучен [10]. В этой работе, в частности, приведено дисперсионное уравнение для низшего НЕ₁₁₈-колебания, на примере использования которого покажем возможности определения параметров диэлектрических образцов в виде пластин произвольной формы. Для этого запишем это уравнение в одноволновом приближении:

$$\left[\frac{p_{11}^2}{(F_{11}p_{11}^2 + \gamma_{11}^2)\gamma_{11}^2} \frac{p_{21}^2}{\Gamma_{11}^2 + p_{21}^2} - f_{11} \frac{ah}{8} \left(1 - \frac{1}{p_{11}^2 a^2} \right) \right] \times \\ \times \left[\frac{p_{21}(q_{11}^2 + \xi_{11}^2)(\Gamma_{11}^2 + p_{21}^2)F'_{11} + \frac{\epsilon}{f'_{11}} \frac{8}{ah}}{\gamma_{11}} \right] - \\ - \frac{\Gamma_{11}^2 + p_{21}^2}{a^2 p_{11}^2 \xi_{11}^2 (\Gamma_{11}^2 + p_{21}^2)} (g_{11}^2 + \xi_{11}^2) \left(\Gamma_{11}^2 - \frac{p_{11}^2 p_{21}^2}{\gamma_{11}^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где a — внутренний радиус цилиндрического волновода; h — высота радиального волновода, равная толщине диэлектрической пластины;

$$f_{11} = \gamma_a + \Gamma_{11} th \left(\Gamma_{11} \frac{h}{2} \right); \quad f'_{11} = \frac{1}{\gamma'_a} + \epsilon \frac{1}{\Gamma'_{11}} th \left(\Gamma'_{11} \frac{h}{2} \right);$$

$$F_{11} = - \frac{1}{\gamma_{11}^2 a} \frac{1}{I_1'(\gamma_{11} a) K_1''(\gamma_{11} a)}; \\ F'_{11} = - \frac{1}{p_{11} \xi_{11} a I_1(\xi_{11} a) K_1(\xi_{11} a)};$$

$$p_{11} = \frac{1,841}{a}; \quad p_{21} = \frac{2\pi}{h}; \quad \Gamma'_{11} = \left[\left(\frac{3,832}{a} \right)^2 - k^2 \epsilon \right]^{1/2};$$

$$\Gamma_{11} = \left[\left(\frac{1,841}{a} \right)^2 - k^2 \epsilon \right]^{1/2}; \quad \gamma_{11} = (p_{11}^2 - k^2 \epsilon)^{1/2};$$

$$\xi_{11} = (p_{21} - k\epsilon)^{1/2}; \quad \gamma_a = (p_{11} - k)^{1/2};$$

$$\gamma'_a = \left[\left(\frac{3,832}{a} \right)^2 - k^2 \right]^{1/2}.$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по этому уравнению зависимости резонансной длины волны λ , нормированной на критическую длину волны λ_{cr} поля H_{11} пустого волновода, от диэлектрической проницаемости исследуемого диэлектрического образца $\epsilon = 0,5 \dots 4,0$ (рис. 2, a) и $\epsilon = 4,0 \dots 12,0$ (рис. 2, b). Зависимости определены для отношения толщины диэлектрика h к внутреннему радиусу a цилиндрического волновода $h/a = 0,2 \dots 1,6$ (соответственно кривые 1–8).

Порядок определения диэлектрической проницаемости анизотропного диэлектрического образца заключается в следующем. Исследуемый диэлектрик выбирается в виде тонкой пластины произвольных размеров и формы поперечного сечения. По кривым рис. 2 в необходимом частотном диапазоне и предполагаемом значении компонент диэлектрической проницаемости определяют геометрические размеры измерительного резонатора и изготавливают его. В макете измерительного резонатора с исследуемым диэлектрическим образцом возбуждаются собственные колебания НЕ₁₁₈ с помощью микроволнового генератора качающейся частоты (например, панорамного измерителя КСВН). При этом резонатор размещают в волноводный тракт с возможностью его вращения относительно элемента возбуждения колебаний. При произвольном расположении резонатора относительно элемента возбуждения на экране индикаторного устройства должны появиться две резонансные кривые в случае анизотропного диэлектрического образца и одна — в случае

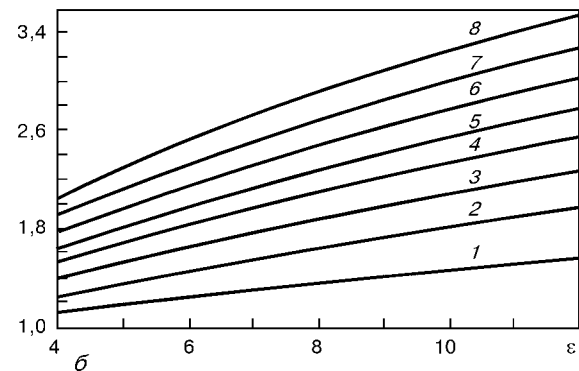
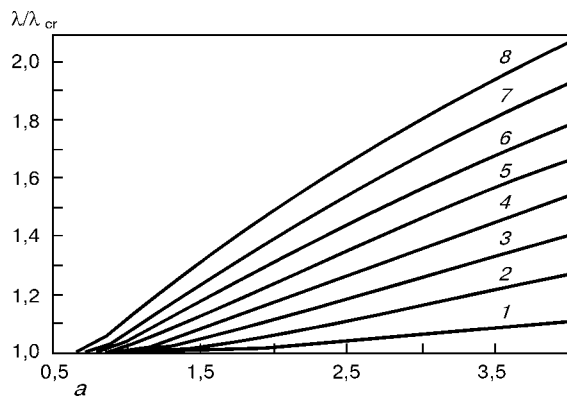


Рис. 2. Расчетные кривые зависимостей нормированной резонансной длины волны λ/λ_{cr} от диэлектрической проницаемости ϵ в диапазоне $\epsilon = 0,5 \dots 4,0$ (a) и $4 \dots 12$ (b) для $h/a = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6$ (соответственно кривые 1–8)

изотропного. Максимальная амплитуда одного из выбранных колебаний при одновременном подавлении другого достигается вращением резонатора относительно элемента возбуждения.

После полного подавления одного из двух колебаний направление одной из кристаллических осей в диэлектрическом образце устанавливается по направлению вектора электрического поля резонирующего колебания HE_{11g} относительно плоскости образца. В этих условиях измеряют также значение резонансной частоты первого резонансного колебания. Аналогично определяется второе направление кристаллической оси и значение резонансной частоты другого колебания. В случае однородного изотропного образца диэлектрика в измерительном резонаторе возбуждают электромагнитные колебания на одной резонансной частоте, не изменяющейся при вращении резонатора. Далее по измеренным значениям резонансной частоты и известным геометрическим размерам резонатора с помощью дисперсионного соотношения (1) определяют значение одной из компонент диэлектрической проницаемости исследуемого вещества и аналогично — второй. Если не требуется высокая точность, оценить значения диэлектрической проницаемости можно по расчетным кривым (рис. 2) и измеренным значениям $\lambda/\lambda_{сг}$ в выбранном измерительном резонаторе.

Результаты экспериментальных исследований. Для иллюстрации возможностей данного метода нами были определены значения диэлектрической проницаемости изотропных материалов: фторопласта-4, плавного и монокристаллического кварца. Измерения проводили в диапазоне частот 10... 70 ГГц, для чего были изготовлены макеты измерительных резонаторов по рис. 1 с внутренними диаметрами цилиндрических отрезков волноводов 2,00... 3,50 мм для миллиметрового диапазона и 5,00... 15,00 мм — для сантиметрового. Образцы как изотропных, так и анизотропных диэлектриков были изготовлены в форме параллелепипеда, квадрата либо имели форму круга. Толщина диэлектрических образцов варьировалась в пределах 0,04... 3,04 мм в зависимости от выбранного диапазона частот. Размеры резонаторов выполняли с точностью не менее 10 мкм, в ряде случаев образцы тщательно шлифовали.

Полученные значения диэлектрической проницаемости ϵ сведены в таблицы. В табл. 1 представлены результаты измерения данным методом диэлектрической проницаемости образцов фторопласта-4, а также соответствующих резонансных частот. Значения величины ϵ фторопласта-4 получены для одного образца в виде диска диаметром 20 мм и толщиной $h = 3,04$ мм (№1-4), а также для пленки в виде параллелепипеда толщиной 0,04 мм сечением $6 \times 10 \text{ мм}^2$ (№ 5). Здесь же приведены и результаты измерения параметров диэлектрической проницаемости образцов плавного кварца в виде диска диаметром 23 мм и толщиной 1,56 мм (№ 10-13), а также диаметром 10 мм и толщиной 0,27 мм (№ 14). Результаты измерения компонент диэлектрической проницаемости ϵ_{\perp} и ϵ_{\parallel} образцов монокристаллического кварца (табл. 2) получены для образца в виде пластины размером $20 \times 20 \times 2,52$ мм (№ 1) и $20 \times 20 \times 1,51 \text{ мм}^3$ (№ 2-5). Для сравнения в таблицах указаны также и литератур-

ные данные. Интересно отметить, что по более старым справочным данным (№ 6 из табл. 2) значения параметров ϵ_{\perp} и ϵ_{\parallel} для образцов монокристаллического кварца заметно отличаются от точнее измеренных из более поздних работ (№ 7-8). Как видно из табл. 2, полученные нами результаты достаточно хорошо совпадают с последними литературными данными.

Для каждого из выбранных нами материалов был выполнен расчет средней квадратической погрешности измерений. При этом погрешности измерений внутреннего диаметра цилиндрической части измерительного резонатора и толщины исследуемого образца были приняты равными $\pm 0,01$ мм, а погрешность измерения частоты во всех рабочих диапазонах — ± 10 МГц. Результаты расчетов показали, что для всех условий экспериментов погрешность измерений диэлектрической проницаемости составила 1... 2 %. Следует отметить, что она может быть существенно уменьшена, если повысить точность изготовления образцов и измерения их толщины; то же касается диаметров измерительных резонаторов. Точность измерений можно также повысить при использовании высокостабильного измерительного генератора.

Обсуждение результатов. Как известно, в микроволновом диапазоне наибольшее распространение получили резонансные методы измерения электрических параметров диэлектриков, основанные на обычных цилиндрическом или прямоугольном резонаторах, полностью или частично заполненных образцом диэлектрика. Из резонансных наиболее точным является метод, при котором резонатор полностью заполнен исследуемым диэлектриком. В случае сантиметрового диапазона для этого требуются довольно большие расходы материала диэлектрика, выполняемого в виде параллелепипеда, цилиндра или объема иной формы с высокой точностью. При этом возникает дополнительно проблема ввода в такой резонатор элементов связи. В случае использования в качестве образца диэлектрика малых размеров, частично заполняющего резонатор, необходимо удовлетворить условие малых возмущений, что ограничивает возможности метода.

В рассмотренной нами методике исследуемый образец ДЭ в виде пластины является частью резонатора, а пятно зондирующего поля занимает малую часть диэлектрика в связи с использованием запредельных волноводов. Та-

Таблица 1. Значения диэлектрической проницаемости образцов из различных материалов

№ п/п	Материал	f , ГГц	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Толщина образца h , мм	Источник информации	
1	Фторопласт-4	10,91	2,10	3,04	Наши измерения	
2		15,52	2,10	3,04		
3		25,90	2,12	3,04		
4		33,88	2,11	3,04		
5	Плавный кварц	69,74	2,09	0,04	»	
6		10^{-3}	2,00	—		[11]
7		$10^{-7} \dots 3,0$	2,10	—		[12]
8	Плавный кварц	10,0...25,0	2,08	—	»	
9		$6 \cdot 10^{-8} \dots 3,0$	2,10	—		[16]
10		14,86	3,80	1,56		Наши измерения
11	Монокристаллический кварц	17,76	3,79	1,56	»	
12		22,00	3,83	1,56		
13		25,20	3,79	1,56		
14		63,00	3,82	1,56		
15		—	3,75	—		[11]
16		10,00	3,80	—		[16]
17		$3,0 \dots 25,0$	3,78	—		[15]



Таблица 2. Значения компонент диэлектрической проницаемости образцов монокристаллического кварца

№ п/п	Частота, ГГц	Диэлектрическая проницаемость		Толщина образца h , мм	Источник информации
		ϵ_{\perp}	ϵ_{\parallel}		
1	14,75	4,46	—	2,52	Наши измерения
	14,53	—	4,63		
2	20,96	4,46	—	1,51	»
	20,64	—	4,64		
3	30,95	4,40	—	1,51	»
	30,63	—	4,60		
4	53,13	4,43	—	1,51	»
	52,25	—	4,64		
5	61,05	4,44	—	1,51	»
	60,48	—	4,62		
6	—	4,27	—	—	[13]
	—	—	4,34		
7	30,00	4,43	—	—	[14]
	—	—	4,633		
8	—	4,45	—	—	[18]
	—	—	4,60		

ким образом, по своим конструктивным особенностям ВДР на ортогональном пересечении волноводов является «полностью заполненным» резонатором с запердевыми связями. К тому же такой резонатор достаточно просто включается в измерительный волноводный тракт. В описанных нами экспериментах выходной фланец измерительного резонатора достаточно плотно накладывался на стандартный фланец соответствующего прямоугольного волновода.

Предложенная методика позволяет проводить неразрушающие измерения и контроль параметров диэлектриков в виде тонких плоских пластин произвольных размеров. С помощью данного метода возможны локальные измерения параметров изотропных и анизотропных диэлектриков, а также обнаружение различных дефектов в изотропных диэлектрических образцах. Размер пятна электромагнитного поля, зондирующего диэлектрический образец, зависит от выбранного диапазона частот, геометрии резонансной структуры и значений диэлектрической проницаемости.

Полученные рассмотренным методом значения диэлектрических проницаемостей известных диэлектриков достаточно хорошо согласуются с литературными данными. Следует также заметить, что во всех исследованных нами условиях при вращении измерительного резонатора изменялись лишь значения амплитуды ортогональных колебаний, но не резонансных частот, что свидетельствует о том, что взаимодействие между колебаниями не происходило.

В заключение отметим, что с использованием данной методики нами была обнаружена небольшая анизотропия диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon \leq 0,6$ монокристал-

лических подложек алюмината лантана $LaAlO_3$, вырезанных в плоскости (100). Пластины $LaAlO_3$ перспективны в качестве подложек при эпитаксии высокотемпературных сверхпроводящих пленок с последующим их использованием в микроволновом диапазоне.

1. *Девятков Н. Д., Голант М. Б., Бецкий О. В.* Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. — М.: Радио и связь, 1991. — 168 с.
2. *Физические свойства системы ДНК – вода* / В. Я. Малеев, М. А. Семенов, А. И. Гасан, В. А. Кашпур // Биофизика. — 1993. — № 38. — С. 768–790.
3. *Щеголева Т. Ю.* Исследование диэлектрических характеристик биообъектов в миллиметровом диапазоне радиоволн. — Киев: Наук. думка, 1996. — 187 с.
4. *Определение параметров анизотропных диэлектриков на основе волноводно-диэлектрического резонатора* / Ю. Г. Макеев, В. А. Коробкин, Н. И. Пятак, Н. М. Пивень // ПТЭ. — 1978. — № 6. — С. 104–107.
5. *А. с. 1117538 СССР, МКИ³ G 01 R 27/26 N 22/02.* Устройство для неразрушающего контроля диэлектриков и ферритов / В. А. Коробкин, Ю. Г. Макеев. — Оpubл. 07.10.84; Бюл. № 37.
6. *Измерение параметров диэлектрических подложек на СВЧ* / Ю. Г. Макеев, А. В. Стрижаченко, В. А. Коробкин, В. Г. Де Мондерик // Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1988. — Вып. 3. — С. 48–51.
7. *Измерение анизотропных диэлектрических проницаемостей алюмооксидных материалов* / В. А. Новиков, А. М. Морозов, С. И. Павлов, В. А. Березин // Там же. — 1978. — Вып. 5. — С. 39–45.
8. *Gilbert M., Manfred N.* New method of measurement to anisotropy on microwave frequency // IEEE Trans Instr. Meas. — 1979. — 28, № 3. — P. 198–204.
9. *А. с. 1469398 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00.* Устройство для определения ориентации оптической оси в одноосных диэлектрических кристаллах / А. Я. Кириченко, Т. А. Смирнова, С. Н. Харьковский, Н. Т. Черняк. — Оpubл. 30.03.89; Бюл. № 12.
10. *Макеев Ю. Г., Моторненко А. П.* Свободные аксиально-несимметричные колебания в волноводном разветвлении с магнитодиэлектрическим заполнением // ЖТФ. — 1994. — 64, № 9. — С. 117–126.
11. *Таблицы физических величин* / Справ. под ред. И. К. Кириченко. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.
12. *Хиттель А. Р.* Диэлектрики и их применение. — М.: Госэнергоиздат, 1959. — 336 с.
13. *Физический энциклопедический словарь.* — М.: Гос. науч. изд-во «Сов. энцикл.». — 1960. — Т. 1. — 664 с.
14. *Afsar M. N.* Millimeter-wave dielectric measurement of material // Proc. IEEE. — 73, № 1. — 1985. — P. 131–153.
15. *Оптические материалы для инфракрасной техники* / Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. — М.: Наука, 1995. — 336 с.
16. *Валитов Р. Я., Сретенский В. Н.* Радиоизмерения на сверхвысоких частотах. — М.: Воен. изд-во Мин-ва обороны СССР, 1958. — 412 с.
17. *Розбери Ф.* Справочник по вакуумной технике и технологии / Под общ. ред. Р. А. Нилендера. — М.: Энергия, 1972. — 455 с.
18. *Глюкман Л. И.* Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. — М.: Радио и связь, 1981. — 232 с.

Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Ускова НАНУ, Харьков

Поступила в редакцию 06.11.2001