

Електродинамічні характеристики кераміки на основі системи SrO – Al₂O₃ – SiO₂ в мікрохвильовому діапазоні

В.І. Григорук¹, В.В. Олійник^{1,*}, В.Л. Лаунець¹, Г.В. Лісачук², Р.В. Кривобок², А.В. Захаров²,
Б.А. Карпутін²

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64, 01033 Київ, Україна

² Національний технічний університет "ХПІ", вул. Кирпичова 2, 61002 Харків, Україна

(Одержано 15.06.2017; у відредагованій формі – 07.08.2017; опубліковано online 16.10.2017)

Представлені результати експериментальних досліджень розробленої кераміки на основі трикомпонентної системи SrO–Al₂O₃–SiO₂. Виміряні основні електродинамічні характеристики кераміки: діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат, коефіцієнти передачі та відбиття в частотному діапазоні 26-37,5 ГГц. Показано, що розроблена кераміка в міліметровому діапазоні хвиль має електродинамічні характеристики, які дозволяють її застосування для обтікачів антенних комплексів швидкісних літаючих апаратів, а саму кераміку, згідно класифікації, можна віднести до класу радіопрозорої кераміки.

Ключові слова: Радіопрозора кераміка, Обтікачі антенних комплексів, Коефіцієнти передачі та відбиття, Діелектрична проникність, Тангенс кута діелектричних втрат.

DOI: 10.21272/jnep.9(5).05014

PACS numbers: 41.20.Jb, 77.84.–s

1. ВСТУП

Сучасні приймально-передаючі антенні комплекси літаючих апаратів (ЛА) для ефективної роботи при несприятливих умовах застосовують захисні екрани (обтікачі), які виготовляються з радіопрозорих матеріалів. Вони повинні бути стійкими до зміни температури, мати високу міцність та забезпечувати максимальну радіопрозорість в широкому частотному діапазоні [1]. У той же час, вимоги до ідентифікації цілі, покращення точності наведення на ціль викликають необхідність переходу приймально-передаючої апаратури в міліметровий діапазон хвиль, який характеризується кращою роздільною здатністю, збільшенням швидкості та об'єму передачі даних. Це викликає необхідність розробки нових та удосконалення існуючих радіопрозорих матеріалів, які мають необхідні електродинамічні характеристики саме в міліметровому діапазоні хвиль. Одним із таких діелектриків, придатних до застосування як обтікачі антенних комплексів ЛА, є кераміка на основі трикомпонентної системи SrO–Al₂O₃–SiO₂. Вона характеризується низькими діелектричною проникністю і тангенсом кута діелектричних втрат, високою температурою плавлення та термостійкістю [2].

Дослідженню структури та модернізації технології отримання цього матеріалу присвячено багато робіт [3-5]. Електродинамічні характеристики кераміки досліджувалися в роботах [6, 7]. Необхідно відзначити, що відомості про діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат, які є найважливішими характеристиками сучасних радіопрозорих матеріалів, даного виду кераміки у міліметровому діапазоні радіохвиль у літературних даних нами не знайдені.

Виходячи з наведеного вище метою нашої роботи є проведення експериментальних досліджень елект-

родинамічних характеристик у частотному діапазоні 26-37,5 ГГц розроблених складів керамічних матеріалів, отриманих на основі трикомпонентної системи SrO–Al₂O₃–SiO₂.

2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Вимоги до мікрохвильових характеристик радіопрозорих екранів ЛА виходять з необхідності узгодження хвильових опорів середовищ на межі їх розділу з метою мінімізації амплітуди хвилі відбиття.

Величина амплітуди відбитої хвилі насамперед визначається співвідношенням між діелектричною і магнітною проникностями матеріалу та його провідністю, які дозволяють мінімізувати коефіцієнти відбиття та втрат. При падінні плоскої однорідної електромагнітної хвилі на межу розділу "повітря-середовище" умова, коли відбиття від межі розділу середовищ буде відсутнім, а проходження хвилі буде повним, виконується при рівності хвильових опорів вільного простору Z_0 та середовища екрана антени Z_c .

$$Z_0 = Z_c, \\ Z_0 = \sqrt{\frac{\mu'}{\epsilon'}}; \quad Z_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}},$$

де ϵ' і μ' – відносна діелектрична та магнітна проникність повітря; ϵ і μ – відносна діелектрична та магнітна проникність середовища.

Для межі розділу повітря–середовище з втратами ця умова має вигляд [8]:

$$\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{|\mu - j\sigma_\mu / \omega \mu_0|}{|\epsilon - j\sigma_\epsilon / \omega \epsilon_0|}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (1)$$

де ϵ_0 і μ_0 – діелектрична та магнітна проникність вакууму; σ_ϵ і σ_μ – діелектрична та магнітна провід-

ність середовища; ω – кругова частота електромагнітної хвилі.

Виходячи з того, що для повітря $\epsilon' = \mu' = 1$ формулу (1) можна подати у вигляді:

$$\sqrt{\frac{\mu - j\sigma_\mu / \omega\mu_0}{\epsilon - j\sigma_\epsilon / \omega\epsilon_0}} \cdot \exp\left\{j\left(\arctg \frac{\sigma_\mu}{\omega\mu_0\mu} - \arctg \frac{\sigma_\epsilon}{\omega\epsilon_0\epsilon}\right)\right\} \cong 1. \quad (2)$$

Із рівняння (2) можна перейти до системи рівнянь

$$\begin{cases} \arctg \frac{\sigma_\mu}{\omega\mu_0\mu} = \arctg \frac{\sigma_\epsilon}{\omega\epsilon_0\epsilon} \\ \mu^2 + \frac{\sigma_\mu^2}{\omega^2\mu_0^2} = \epsilon^2 + \frac{\sigma_\epsilon^2}{\omega^2\epsilon_0^2} \end{cases}, \quad (3)$$

розв'язок якої стосовно σ_μ / μ_0 та $\sigma_\epsilon / \epsilon_0$ визначає співвідношення між параметрами середовища при яких практично відсутні втрати на відбиття. Ці співвідношення мають вигляд:

$$\frac{\sigma_\mu}{\mu_0} = \frac{\sigma_\epsilon}{\epsilon_0}; \epsilon = \mu. \quad (4)$$

Якщо середовище є немагнітним діелектриком, то $\mu = 1$. Тоді, для мінімізації відбиття потрібно, щоб діелектрична проникність матеріалу мала якомога менші значення.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

На попередньому етапі дослідження [9, 10] було встановлено оптимальні склади мас для отримання радіопрозорі стронцій анортитової кераміки (рис. 1): склад «0» (ВСК-0), що відповідає точці стехіометрії стронцієвого анортиту (температура плавлення 1654 °C) та склад «2» (ВСК-2) знаходиться в елементарному трикутнику $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{--Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}\text{--SiO}_2$, де температура початку утворення розплаву складає 1383 °C. Хімічні склади, що відповідають точкам на діаграмі в масових відсотках, становлять: ВСК-0 (SiO_2 – 36,89; Al_2O_3 – 31,30; SrO – 31,81 мас. %), ВСК-2 (SiO_2 – 50,0; Al_2O_3 – 25,0; SrO – 25,0 мас. %).

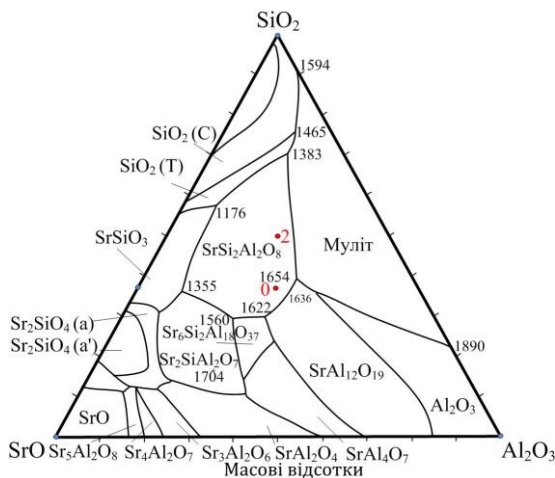


Рис. 1 – Діаграма стану трикомпонентної системи SrO–Al₂O₃–SiO₂ за Шукле [11]

Раніше нами було експериментально встановлено, що введення однокомпонентної мінералізуючої добавки Li_2CO_3 в склад ВСК-0 у кількості 2 мас. % понад 100% сприяє зниженню водопоглинання W , відкритої пористості Π і збільшення уявної щільності $\rho_k \cdot 10^{-3}$ до 2,75 кг/м³ одночасно зі збереженням низьких діелектричних властивостей: $\epsilon = 7,6$, $\text{tg}\delta = 63 \cdot 10^{-4}$ на частоті 10 кГц. Це досягається при більш низьких температурах випалу 1350 °C ніж без введення добавки Li_2CO_3 .

На основі вищеванеданого нами були обрані склади кераміки ВСК-0L (2 мас.% Li_2CO_3 понад 100%) та ВСК-2, вперше розроблений нами для дослідження електродинамічних характеристик в мікрохвильовому діапазоні.

Для отримання експериментальних зразків кераміки були використані кварц Вишневецького родовища, технічний глинозем, карбонат стронцію та карбонат літію.

Технологія виготовлення стронцій анортитової кераміки складів ВСК-0L (2 мас.% Li_2CO_3 понад 100%) та ВСК-2 відбувалася у дві стадії. Це пов'язано зі значною температурною усадкою, що не дає змоги отримати точну форму та розміри виробу. На першій стадії відбувався синтез стронцієвого анортиту, шихту подрібнювали в фарфоровому млині до залишку 4-6% на ситі 10000 отв/см² та формували методом напівсухого пресування на гідравлічному пресі П-125 при питомому тиску 20 МПа. Отримані брикети висушували у сушильній шафі при температурі 110 °C до постійної ваги. Синтез зразків проводився в лабораторній силтвовій печі Naberterm при температурах – для складу ВСК-0L – 1300 °C, для складу ВСК-2 – 1250 °C, витримка при максимальній температурі складала три години. Після синтезу спеки подрібнювались в планетарному млині Retsch, з отриманого матеріалу формувались зразки для дослідження електродинамічних властивостей розробленої кераміки. Синтез зразків складу ВСК-2 проводився при трьох температурах: 1250, 1350 та 1450 °C, зразки складу ВСК-0L випалювались при температурі 1350 °C в слабо окислюваному середовищі. Витримка при максимальній температурі складала одну годину.

Вимірювання електродинамічних характеристик зразків – коефіцієнтів передачі і відбиття, діелектричної проникності ϵ і тангенсу кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ матеріалу проводили у діапазоні частот 26-37,5 ГГц. Використовували стандартні прямокутні хвилеводи перерізом 7,2 × 3,4 мм². Зразки, які досліджувалися, повністю заповнювали переріз хвилеводу та мали товщину – 1,5 мм.

Для визначення параметрів взаємодії електромагнітного випромінювання зі зразками була використана модернізована стандартна апаратура – вимірювач коефіцієнта стоячої хвилі та ослаблення у складі генераторного блоку Р2-65 з індикатором Я2Р-67.

Блок-схема установки для визначення коефіцієнта передачі приведена на рис. 2.

Коефіцієнт передачі визначався по шкалі ослаблення вимірювача Р2-65 в децибелах. На рис. 3 представлені спектри коефіцієнта передачі мікрохвильового випромінювання через зразки кераміки: криві 1, 2, 3 – це результати вимірювання для зраз-

ків складу ВСК-2 випаленого при температурах 1250, 1350 та 1450 °С відповідно, а крива 4 – результат вимірювання складу ВСК-0L, випаленого при температурі 1350 °С.

На рис. 3 приведені спектри коефіцієнта передачі для чотирьох зразків розробленої кераміки.

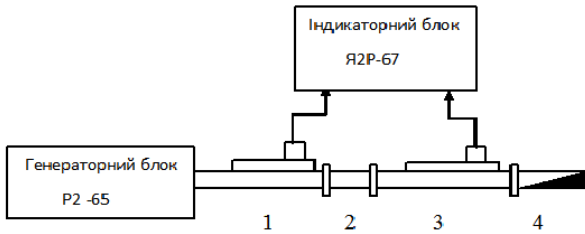


Рис. 2 – Блок-схема експериментальної установки для визначення коефіцієнта передачі: 1, 3 – напрямлені відгалужувачі; 2 – хвилевід із зразком; 4 – узгоджене навантаження

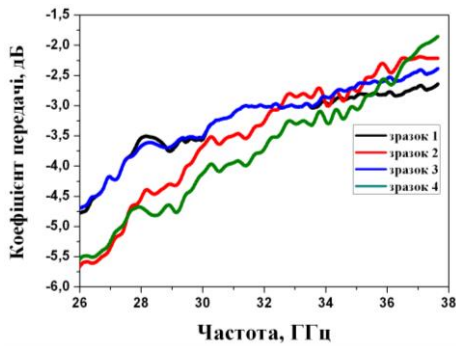


Рис. 3 – Спектральні характеристики коефіцієнта передачі керамічних зразків

Аналізуючи отримані результати, слід відмітити, що мікрохвильові втрати, які вносяться зразками, зменшуються при переході в міліметровий діапазон хвиль (> 30 ГГц) та стають майже однаковими.

На наступному етапі вимірювався коефіцієнт стоячої хвилі $k_{сх}$. По формулі (5) розраховувався коефіцієнт відбиття $r_{відб.}$ в децибелах

$$r_{відб., дБ} = 20 \cdot \lg((k_{сх} - 1)/(k_{сх} + 1)). \quad (5)$$

З отриманих експериментальних результатів (див. рис. 4) виходить, що коефіцієнт відбиття на частотах > 30 ГГц значно зменшується для усіх зразків, що підтверджує правомірність вибору цієї кераміки для застосування саме в міліметровому діапазоні хвиль.

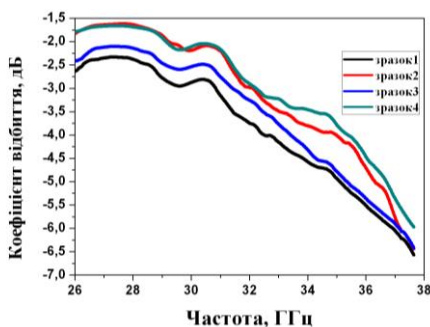


Рис. 4 – Спектральні характеристики коефіцієнта відбиття керамічних зразків

В основу методу визначення електродинамічних параметрів речовини покладена залежність довжини, амплітуди та фази електромагнітної хвилі від електричної та магнітної проникностей речовини. Реалізація методу здійснюється за допомогою установки, блок-схема якої зображена на рис. 5 [12].

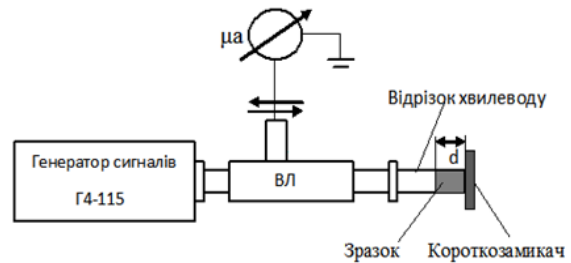


Рис. 5 – Блок-схеми експериментальної установки для вимірювання діелектричної проникності та тангенса діелектричних втрат зразків

Відповідно до цього методу, за допомогою вимірювальної лінії (ВЛ) фіксується структура стоячої хвилі у закороченому хвилеводі без зразка та із зразком і визначається величина зсуву мінімуму хвилі. Математичний аналіз наведеної вище електродинамічної задачі для розрахунку діелектричної проникності приводить до нелінійного рівняння

$$\tanh(pd)/pd = F(d, \Delta Z_{min}, k_{сх}, \lambda_{хв}), \quad (6)$$

де F – функція отриманих із експерименту величин; p – постійна розповсюдження; d – товщина зразка; ΔZ_{min} – зсув мінімуму стоячої хвилі; $\lambda_{хв}$ – довжина хвилі в порожньому хвилеводі.

Розв'язок рівняння дозволяє визначити постійну розповсюдження $p = \alpha + i\beta$ електромагнітної хвилі у матеріалі та обрахувати ϵ і $\text{tg}\delta$ досліджуваного середовища.

На рис. 6 представлені спектри дійсної частини діелектричної проникності досліджуваної кераміки.

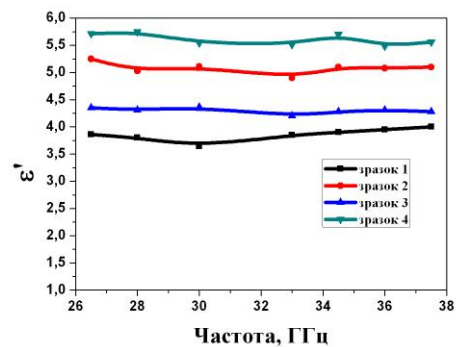


Рис. 6 – Спектри діелектричної проникності зразків кераміки

Спостерігається майже повна відсутність залежності діелектричної проникності зразків від частоти, а сама величина проникності для всіх зразків не перевищує 6.

На рис. 7 представлені спектри $\text{tg}\delta$ досліджуваних зразків кераміки. Вони теж майже не залежать від частоти.

Результати вимірювання діелектричної проник-

ності зразків вказують, що її значення для всіх зразків менше 6, особливо для зразків 1 та 3, та значення тангенсу кута втрат для цих зразків лежать в

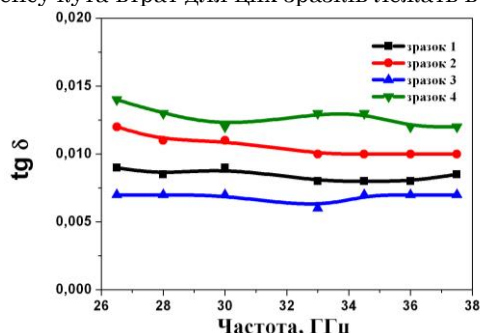


Рис. 7 – Спектри тангенса діелектричних втрат зразків кераміки

діапазоні $5 \cdot 10^{-3}$.

Такі значення відповідають основним вимогам при виборі матеріалів для обтікачів антенних комплексів швидкісних ЛА. Особливо треба відзначити, що значення цих важливих електродинамічних

характеристик розробленої кераміки не змінюється в усьому діапазоні вимірюваних частот.

4. ВИСНОВКИ

В роботі наведені результати дослідження електрофізичних характеристик розроблених керамічних матеріалів на основі трикомпонентної системи $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ в діапазоні частот 26-37,5 ГГц.

Експериментально встановлено, що коефіцієнт передачі та відбиття досліджуваних зразків в мікрохвильовому діапазоні задовольняє вимогам, які висуваються до радіопрозорих матеріалів.

Значення діелектричної проникності досліджуваних керамік лежать в межах 6-4.

Розроблені та виготовлені керамічні матеріали відповідають основним вимогам, висунутим до експлуатації подібних матеріалів та можуть бути придатні для використання як радіопрозорі обтікачі міліметрового діапазону хвиль приймально-передавальних комплексів швидкісних літаючих апаратів.

Electrodynamic Characteristics of Ceramics Based on $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ System in Microwave Range

V.I. Grygoruk¹, V.V. Oliynyk¹, V.L. Launets¹, G.V. Lisachuk², R.V. Kryvobok², A.V. Zakharov²,
B.A. Karputin²

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64, Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine

² National Technical University "KhPI", 2, Kyrpychova Str., 61002 Kharkiv, Ukraine

Results of experimental research of developed ceramics on the basis of three-component $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system have been presented. The influence of mineralizing impurities when entering them into stoichiometric composition of ceramics has been proved. Main electromagnetic characteristics of the ceramics have been measured: permittivity, dielectric loss tangent, transmission and reflection coefficients in the frequency range of 26-37,5 GHz. It has been shown that the developed ceramics for the millimeter-wave band have electrodynamic characteristics which allow to apply these ceramics for a fairing of antenna complexes of the high-speed flying vehicle. According to the classification the ceramics itself may be attributed to the class of radio-transparent ceramics.

Keywords: Radio-transparent ceramics, Fairing, Transmission and reflection coefficients, Permittivity, Dielectric loss tangent.

Электродинамические характеристики керамики на основе системы $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ в микроволновом диапазоне

В.И. Григорук¹, В.В. Олейник¹, В.Л. Лаунец¹, Г.В. Лисачук², Р.В. Кривобок², А.В. Захаров²,
В.А. Карпутин²

¹ Национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 64, 01033 Киев, Украина

² Национальный технический университет "ХПИ", ул. Кирпичова 2, 61002 Харьков, Украина

Представлены результаты экспериментальных исследований разработанной керамики на основе трикомпонентной системы $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Измерены основные электродинамические характеристики керамики: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, коэффициенты передачи и отражения в частотном диапазоне 26-37,5 ГГц. Показано, что разработанная керамика в миллиметровом диапазоне волн имеет электродинамические характеристики, которые позволяют применять ее для обтекателей антенных комплексов скоростных летающих аппаратов, а саму керамику, согласно классификации, можно отнести к классу радиопрозрачной керамики.

Ключевые слова: Радиопрозрачная керамика, Обтекатели антенных комплексов, Коэффициент передачи, Коэффициент отражения, Диэлектрическая проницаемость, Тангенс угла диэлектрических потерь.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. E.I. Suzdal'tsev, *Refractor. Industr. Ceramics* **43** No 3, 103 (2002).
2. G.V. Lisachuk, G.V. Kryvobok, R.V. Dajneko, *Przeglad Elektrotechniczny* **93** No 3, 79 (2017).
3. P. Ptacek, F. Soukal, T. Opravil, E. Bartonickova, *Ceramics Int.* **42** No 7, 8170 (2016).
4. S. Chen, De-Gui Zhu, Xu-Sheng Cai, *Metallurg. Mater. Transact. A* **45** No 9, 3995 (2014).
5. G. Lisachuk, R. Kryvobok, A. Zakharov, V. Tsovma, O. Lapuzina, *East. Europ. J. Enterprise Technol.* **1**, No 6, 10 (2017).
6. I.G. Talmy, J.A. Zaykoski. Pat. US 5641440, USA, publ. 24.06.1997.
7. G.V. Lisachuk, R.V. Kryvobok, A.V. Zakharov, A.V. Chefranov, E.V. Lisachuk, *Funct. Mater.* **24**, 162 (2017).
8. Б.А. Демьянчук, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре* No 5, 19 (2004) (B.A. Demyanchuk, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* No 5, 19 (2004)) [In Russian].
9. Г.В. Лисачук, Р.В. Кривобок, А.В. Захаров, Е.Ю. Федоренко, Я.Н. Питак. *Строительные материалы и изделия* 1, 20 (2015) (G.V. Lisachuk, R.V. Krivobok, A.V. Zakharov, Ye.Yu. Fedorenko, Ya.N. Pitak, *Stroitelnyye materialy i izdeliya* 1, 20 (2015)) [In Russian].
10. A. Shukla, Doctoral dissertation, *École Polytechnique de Montreal*, 350 (2012).
11. Г.В. Лисачук, Р.В. Кривобок, А.В. Захаров, Е.Ю. Федоренко, М.С. Прыткина, А.В. Рябинин, *Космическая техника. Ракетное вооружение* No 3, 74 (2015) (G.V. Lisachuk, R.V. Krivobok, A.V. Zakharov, Ye.Yu. Fedorenko, M.S. Prytkina, A.V. Ryabinin, *Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoye vooruzheniye* No 3, 74 (2015)) [In Russian].
12. *Измерения на сверхвысоких частотах* (Ред. В.Б. Штейншлейгера) (Москва: Сов. радио: 1952) (*Izmereniya na sverkhvysokikh chastotakh* (Red. V.B. Shteynshleygera) (Moskva: Sov. radio: 1952)) [In Russian].