

**В.М. Деркач¹, Є.А. Алексєєв^{2,3}, Р.В. Головащенко¹,
Є.М. Острижний¹, А.О. Мещеряков², С.І. Тарапов^{1,3,4}**

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

² Радіоастрономічний інститут НАН України

4, вул. Мистецтв, Харків, 61002, Україна

³ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

4, м. Свободи, Харків, 61022, Україна

⁴ Харківський національний університет радіоелектроніки

14, просп. Науки, Харків, 61166, Україна

E-mail: derkach@ire.kharkov.ua, ealekseev@rian.kharkov.ua

Низькотемпературне дослідження втрат електромагнітної енергії в слабопоглинаючих матеріалах у діапазоні частот 110...140 ГГц

Предмет і мета роботи. Предметом дослідження є спектральні та енергетичні характеристики дискових діелектричних резонаторів (ДДР) на модах шепочучої галереї (МШГ), виготовлених з діелектричних і напівпровідникових матеріалів з малими втратами мікрохвильової енергії. Дослідження проведені для зразків з матеріалів: кремній, легований золотом (Si:Au); алмаз, вирощений при осадженні з газової фази (CVD-алмаз); алмаз, отриманий з використанням дугового плазмового струменя (APJ-алмаз), і корундова кераміка на основі Al_2O_3 . Метою роботи є визначення внесків механізмів поглинання мікрохвильової енергії в означених матеріалах на підставі температурних залежностей втрат і знаходження фізичних параметрів, відповідальних за ці механізми.

Методи і методологія роботи. Експериментальні значення величин втрат отримано за допомогою методу ДДР на МШГ з використанням криодіелектрометра. Виконано феноменологічне моделювання для поділу внеску втрат у температурну залежність поглинання у досліджуваних матеріалах.

Результати роботи. Представлено результати експериментального дослідження температурної залежності втрат у деяких слабопоглинаючих матеріалах на частотах 110...140 ГГц в області температур 4,2...300 К. Розглянуто особливості конструкції розробленого авторами цієї роботи програмно-керованого вимірювального блока з можливістю заміни лампи зворотної хвилі у діапазоні частот 34...144 ГГц для застосування у криодіелектрометрі. Блок забезпечує програмно-кероване перестроювання частоти зі спектральною роздільною здатністю близько 0,1 МГц. Визначено внески основних механізмів втрат та фізичні параметри матеріалів, відповідальних за ці механізми.

Висновок. Зареєстровано та проаналізовано температурні залежності величин втрат у слабопоглинаючих матеріалах із застосуванням розробленого вимірювального блока, який також може бути використаний як незалежне кероване джерело випромінювання та включений у систему синтезу частоти з фазовим автопідстроюванням. Лл. 10. Табл. 2. Бібліогр.: 43 назв.

Ключові слова: дисковий діелектричний резонатор, моди шепочучої галереї, діелектрик з малими втратами, високоомний напівпровідник, криогенні температури, низькотемпературна діелектрометрія, міліметрові хвилі.

Вимірювання діелектричних параметрів слабопоглинаючих матеріалів у широкому діапазоні частот і температур, аж до наднизьких, дозволяє визначити як рівень поглинання електромагнітної енергії, так і основні фізичні механізми, відповідальні за поглинання [1–4].

Ця інформація важлива для синтезу нових матеріалів та їх практичного застосування [5–7]. На цей час діелектричні матеріали з малими втратами набули широкого застосування в пристроях гігагерцового діапазону частот. Зокрема, вони використовуються в елементах теле-

комунікаційних систем, вікнах введення-виведення потужних гіротронів та іншому високоенергетичному устаткуванні [6, 8]. Розробка нових матеріалів з мінімальним поглинанням електромагнітної енергії в гігагерцовому і тим більше терагерцовому діапазонах частот вимагає чіткого розуміння фізичних причин, що обумовлюють діелектричні втрати. Як відомо, температурні залежності тангенса кута втрат, особливо при низьких температурах, дозволяють визначити фактори, що впливають на поглинання в таких матеріалах [1].

Один з найбільш точних методів вимірювання діелектричних параметрів слабопоглинаючих матеріалів у міліметровому діапазоні довжин хвиль заснований на вивченні спектральних і енергетичних характеристик високодобротних дискових діелектричних резонаторів (ДДР) на модах шепочучої галереї (МШГ), виготовлених з досліджуваних матеріалів [9–13]. До теперішнього часу лише окремі експерименти на основі резонансних методів проведено на частотах понад 100 ГГц і при температурах нижче температури рідкого азоту [14, 15]. Ось чому виконане в цій роботі експериментальне вивчення температурних залежностей тангенса кута втрат діелектричних і високоомних напівпровідникових матеріалів на частотах вище 110 ГГц при криогенних температурах є актуальним.

Для реалізації цього методу використовується розроблений нами вимірювальний блок діапазону 110...144 ГГц на основі лампи зворотної хвилі (ЛЗХ). У складі низькотемпературного діелектрометра вказаний блок з комп'ютерним керуванням забезпечує спектральну роздільну здатність близько 0,1 МГц.

1. Досліджувані зразки і методика вимірювання. Монокристалічні матеріали з алмазоподібною кристалічною ґраткою, що мають високий питомий опір, характеризуються слабким поглинанням електромагнітної енергії в міліметровому діапазоні довжин хвиль [16]. Серед інших їх властивостей, важливих для практичного застосування, – висока твердість, великий коефіцієнт теплопровідності і низький коефіцієнт теплового розширення [6].

У даній роботі досліджено температурні залежності тангенса кута діелектричних втрат таких зразків високоомних напівпровідни-

вих матеріалів, як кремній, легований золотом (Si:Au); алмаз, вирощений при осадженні з газової фази (CVD-алмаз, *Chemical Vapor Deposition*); алмаз, отриманий з використанням дугового плазмового струменя (APJ-алмаз, *Arc Plasma Jet*) і корундова кераміка на основі Al_2O_3 [7, 16–18], які відносять до напівпровідникових матеріалів з алмазоподібною кристалічною ґраткою. APJ-алмази вирощено з використанням дугового плазмового струменя в Пекінському університеті науки і технології. Діелектричні втрати в Si:Au прагнуть до мінімальної теоретичної межі для напівпровідників [16], причому домішки Au впливають на концентрацію вільних носіїв заряду [19]. У діапазоні низьких температур ці напівпровідникові матеріали характеризуються вираженими діелектричними властивостями через «виморожування» вільних носіїв заряду [20–22].

Багато керамічних матеріалів на основі оксидів металів добре зарекомендували себе з точки зору застосування в якості матеріалів для мікрохвильової електроніки [23–25]. Досліджена в цій роботі корундова кераміка (на основі Al_2O_3) має міцний іонний міжатомний зв'язок [25]. Матеріал перебуває в стабільній гексагональній фазі, що становить особливий інтерес у матеріалознавстві. З цієї причини кераміка з оксиду алюмінію є найбільш твердою з поміж оксидної кераміки. Висока твердість, добрі діелектричні властивості, стійкість до впливу температури характеризують цей матеріал як перспективний для широкого діапазону застосувань. Високочистий оксид алюмінію можна використовувати як у окиснювальній, так і у відновлювальній атмосфері до високих температур, що зручно для інтеграції з різними сполуками.

На рис. 1 наведено ДДР, що були виготовлені з досліджуваних матеріалів. Методика вимірювання характеристик ДДР на МШГ [26] полягає у визначенні зсувів резонансних частот мод, що реєструються, які співвідносяться зі зміною дійсної частини діелектричної проникності (ϵ') матеріалу, і зміні добротності резонатора на цих модах, пов'язаних з втратами електромагнітної енергії ($\text{tg } \delta$). Цей метод забезпечує високу точність (< 5 %) визначення $\text{tg } \delta_\Sigma$, зручний для використання в міліметровому діапазоні довжин хвиль, оскільки ДДР

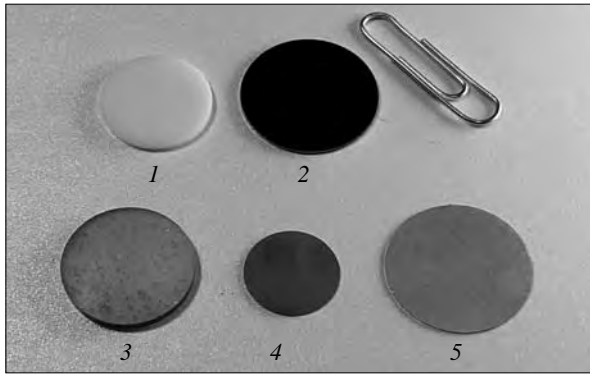


Рис. 1. Досліджувані ДДР: 1 – корундова кераміка Al_2O_3 ; 2 – Si:Au; 3 – CVD-алмаз *De Beers*; 4 – CVD-алмаз *GPI*; 5 – *APJ*-алмаз

може бути поміщений в криогенну систему [26] невеликих розмірів. Геометричні розміри ДДР вказані в табл. 1.

Навантажену добротність ДДР можна визначити як [27, 28]

$$Q^{-1} \approx k \operatorname{tg} \delta + Q_r^{-1} + Q_c^{-1} + Q_w^{-1}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт включення діелектрика; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута втрат у досліджуваному матеріалі; Q_r – радіаційна добротність; Q_c – добротність, пов'язана з провідністю; Q_w – добротність, обумовлена зв'язком ДДР з підведеними діелектричними хвилеводами.

У цілому величину, обернено пропорційну навантаженій добротності, можна вважати наближено рівною тангенсу кута втрат у матеріалі, якщо інші втрати електромагнітної енергії в електродинамічній системі звести до мінімальних (як зазначено, наприклад, у [10, 29]):

$$Q^{-1} \approx k \operatorname{tg} \delta. \quad (2)$$

У цій роботі, згідно з методиками оцінки радіаційної добротності Q_r [29, 30] для ДДР використовуваних розмірів, величина втрат на ви-

Таблиця 1. Геометричні параметри досліджуваних зразків

Матеріал	Діаметр d , мм	Висота h , мм
Корундова кераміка (Al_2O_3)	16,02	1,41
Кремній, легований золотом (Si:Au)	18,50	1,57
CVD-алмаз <i>De Beers</i>	18,02	1,85
CVD-алмаз <i>GPI</i>	13,07	0,36
<i>APJ</i> -алмаз	19,80	0,30

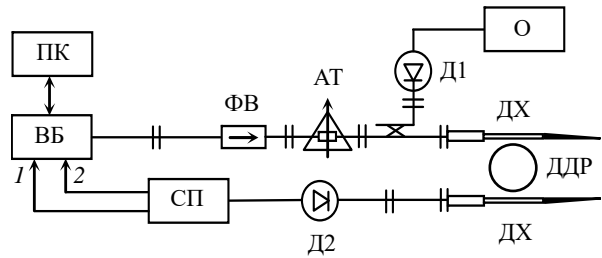


Рис. 2. Блок-схема стану: вимірювальний блок (ВБ); феритовий вентиль (ФВ); вимірювальний атенюатор (АТ); детектор контролю вихідного сигналу (Д1); дисковий діелектричний резонатор (ДДР); збуджувальний і приймальний діелектричні хвилеводи (ДХ); детектор сигналу, що пройшов (Д2); селективний підсилювач (СП); осцилограф (О); персональний комп'ютер (ПК)

промінювання енергії не є переважною, зважаючи на збудження МШГ з великими азимутними індексами. Крім того, для проведення експерименту створено умови, за яких втратами на зв'язок ДДР з елементами збудження Q_w^{-1} можна знехтувати [31]. Також конструктивно зведено до мінімуму вплив інших факторів, що додатково позначаються на величині втрат, зокрема втрат на провідність, які визначаються Q_c^{-1} .

2. Експериментальне устаткування. Перед проведенням низькотемпературного експерименту необхідно ретельно вивчити властивості резонатора, такі як спектр резонансних коливань у заданому діапазоні частот, добротність резонатора на окремих модах, які обрані в якості робочих, і визначити типи коливань, дослідивши структуру їх поля.

Функціональну схему експериментального устаткування показано на рис. 2 [26, 32–33]. Вихідний амплітудно-модульований сигнал від вимірювального блока проходить через досліджуваний резонатор і реєструється за допомогою мікрохвильового детектора (рис. 2). Вихідний сигнал детектора посилюється і надходить на вхід 1 вимірювального блока. Одночасно сигнал з детектора посилюється селективним підсилювачем і надходить на вхід 2 вимірювального блока для аналого-цифрового перетворення. Записи спектрів забезпечуються шляхом покрокового сканування анодної напруги ЛЗХ з вимірюванням відгуку досліджуваного кола в кожній точці. Детальний опис вимірювального блока наведено в [34].

Дослідження при низьких температурах були проведені на спеціалізованому криодіелек-

трометрі «Торнадо» (рис. 3), який входить до складу «Кріомагнітного радіоспектроскопічного комплексу міліметрового діапазону довжин хвиль» (наукового об'єкта, що є Національним надбанням України [31, 35]).

Під час низькотемпературного експерименту реєструвався спектр мод резонатора при різних значеннях температури, на основі якого визначалися резонансні частоти і добротності ДДР. Керування вимірювальним блоком, збирання та оброблення інформації від детекторів і термометрів здійснювалися за допомогою раніше розробленого апаратно-програмного комплексу [32].

Температурні дослідження проводилися з використанням розроблених авторами блоків вимірювання і стабілізації температури [36, 37]. У результаті нам вперше вдалося виміряти діелектричні параметри найбільш цікавого класу слабопоглинаючих матеріалів у діапазоні частот 110...140 ГГц і за температур, наближених до температури рідкого гелію.

3. Функціональні особливості вимірювального блока. Для отримання максимально широкого діапазону робочих частот вимірювальний блок побудований на основі ЛЗХ. Додатковою перевагою застосування ЛЗХ є мож-



Рис. 3. Кріодіелектрометр «Торнадо»

ливість істотного розширення діапазону робочих частот за рахунок використання змінних ламп, які за дуже схожих параметрів джерел живлення здатні забезпечити роботу на частотах від 34 до 144 ГГц. Такий широкий діапазон частот забезпечується трьома ЛЗХ, що працюють у діапазонах 34...52, 52...80 і 110...144 ГГц. Функціональну схему вимірювального блока показано на рис. 4. Основою блока є ЛЗХ зі ста-

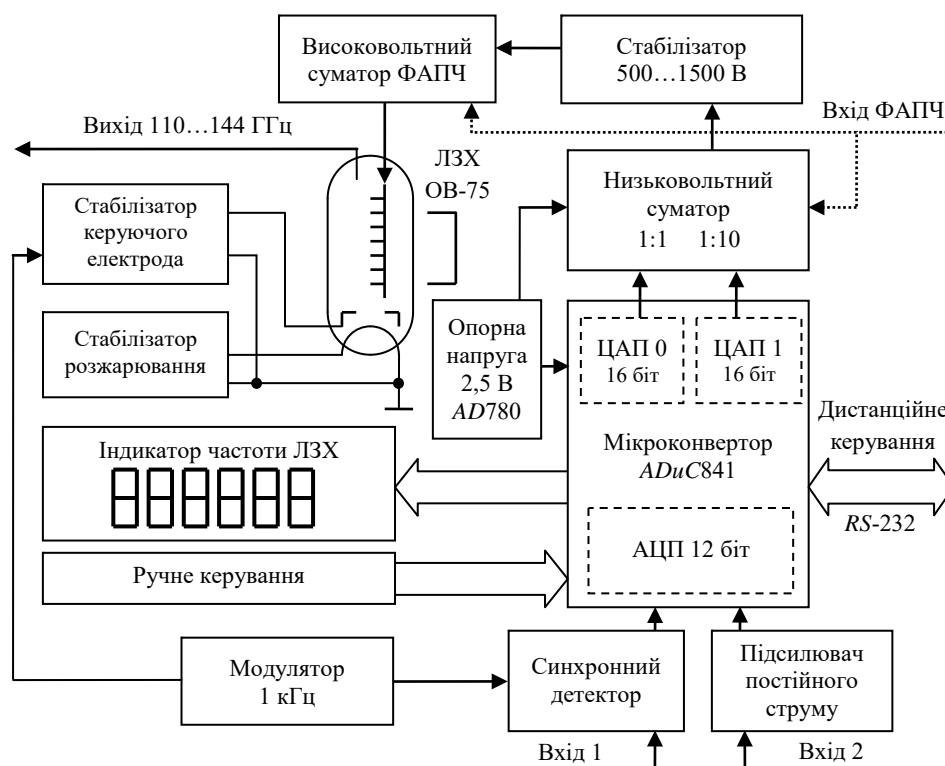


Рис. 4. Функціональна схема вимірювального блока



Рис. 5. Зовнішній вигляд вимірювального блока

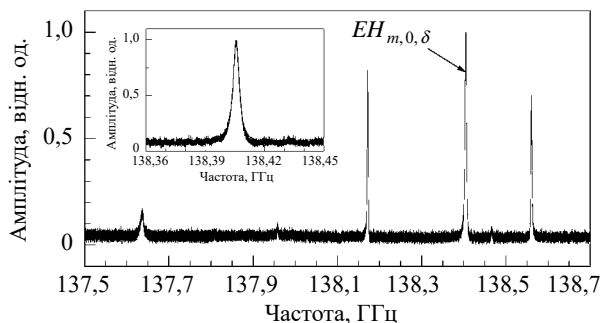


Рис. 6. Спектральна характеристика ДДР на МШГ з Si:Au у 2-мм діапазоні довжин хвиль ($T = 4,2$ К)

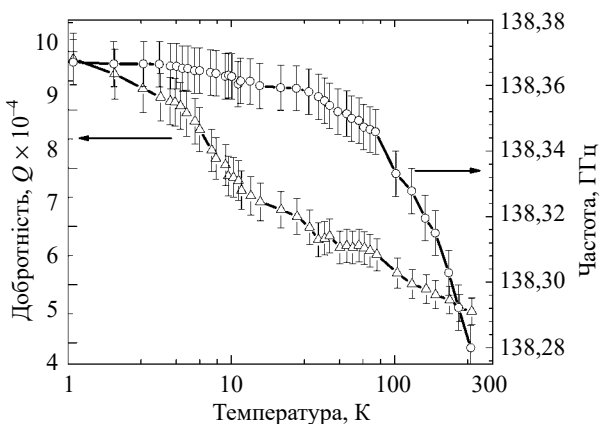


Рис. 7. Залежність частоти і добротності ДДР з Si:Au від температури

білізаторами анодної напруги, розжарювання і керуючого електрода. Перестроювання частоти вихідного сигналу ЛЗХ ОВ-75 у діапазоні 110...144 ГГц забезпечується стабілізатором анодної напруги 500...1 500 В (тобто при зміні приблизно на 1 000 В), який керується за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП 0 та ЦАП 1 на рис. 4). За необхідності вимірювальний блок може також бути застосованим у системах з синтезом частоти ([38]) завдяки наявності високовольтного суматора фазового автопідстроювання частоти (високовольтний суматор ФАПЧ на рис. 4).

Як показано в роботах [39, 40], стабільність частоти і спектральну чистоту вихідного сигналу ЛЗХ можна отримати кращі за 0,1 МГц з використанням методів параметричної стабілізації. Оскільки крутизна перестроювання ОВ-75 може досягати 60 МГц / В, то для практичної реалізації такої спектральної роздільної здатності необхідно забезпечити мінімальний крок зміни анодної напруги близько $(0,1 \text{ МГц}) / (60 \text{ МГц} / \text{В}) \approx 0,0016 \text{ В}$. Це відповідає $(1 \text{ 000 В}) / (0,0016 \text{ В}) \approx 600 \text{ 000}$ ступеням регулювання. Зауважимо, що 16-бітний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) забезпечує тільки 65 536 ступенів. Для вирішення цієї проблеми ми застосували джерело опорної напруги на основі підсумовування напруги двох незалежних ЦАП 0 та ЦАП 1 (рис. 4), один з яких (ЦАП 0) забезпечує 65 536 кроків сканування частоти всього діапазону, в той час як інший (ЦАП 1) дозволяє проводити вимірювання з підвищеною роздільною здатністю 1/10 діапазону (зрозуміло, що починаючи зі значення, яке вже було встановлено з використанням ЦАП 0).

Основою вимірювальної системи блока є мікроконвертор *ADuC841* [41], який включає в себе всі необхідні аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі, а також послідовний інтерфейс для зв'язку з комп'ютером, який здійснює керування. У якості 16-бітних ЦАП ми застосували внутрішні широтно-імпульсні модулятори мікроконвертора в режимі *S-D* цифро-аналогових перетворювачів. З метою підвищення стабільності та точності таких перетворювачів живлення аналогової частини мікроконвертора забезпечується спеціальним стабілізатором з використанням прецизійного джерела опорної напруги *AD780*. Для зручності роботи передбачена можливість ручного керування значенням робочої частоти ЛЗХ, а також відображення встановленого значення частоти на світлодіодному індикаторі (рис. 4).

Вихідний сигнал ЛЗХ модулюється за амплітудою, а для підвищення чутливості в основному вимірювальному каналі (Вхід 1, рис. 4) використовується синхронне детектування. Допоміжний канал (Вхід 2, рис. 4) дозволяє проводити вимірювання додаткового сигналу (наприклад, пропорційного температури) одночасно з основним.

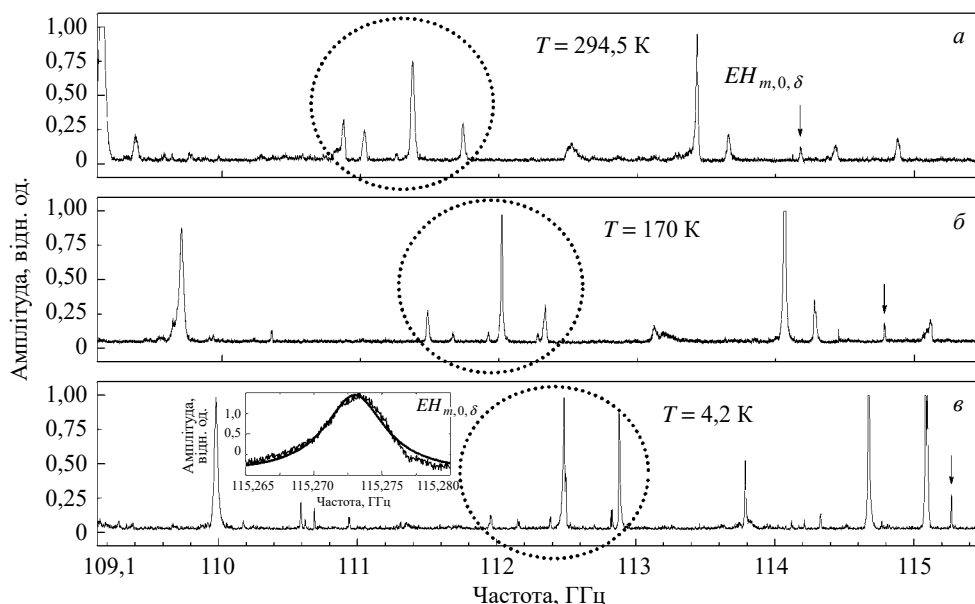


Рис. 8. Спектральні характеристики ДДР на МШГ з корундової кераміки Al_2O_3 при температурах 294,5 К (а), 170 К (б) і 4,2 К (в); на вставці (в) – резонансна крива МШГ і її апроксимація функцією Лоренца

Зовнішній вигляд вимірювального блока наведено на рис. 5.

4. Температурні зміни параметрів резонаторів. Експеримент. У процесі експерименту було проведено вимірювання амплітудно-частотних характеристик та добротності резонаторів у широкій області температур і визначено температурну залежність тангенса кута втрат у матеріалах. Як робочі МШГ використовувалися моди типу квазі- $TE_{m,0,\delta}$ ($EH_{m,0,\delta}$) з азимутними індексами $m = 50 \dots 70$.

Приклади зареєстрованої спектральної характеристики ДДР з компенсованого напівпровідника Si:Au в діапазоні частот 137,5...138,7 ГГц за температури 4,2 К і резонансної кривої МШГ з апроксимацією її функцією Лоренца наведено на рис. 6. Стрілка вказує на резонансну криву робочої МШГ. Залежність тангенса кута втрат цього зразка від температури показано на рис. 7. Помітні немонотонне зростання резонансної частоти (приблизно 0,1 ГГц) і добротності (на 5×10^4) зі зниженням температури від 300 до 4,2 К.

На рис. 8 як характерний приклад показано спектральну характеристику ДДР, виготовленого зі зразка корундової кераміки Al_2O_3 при трьох значеннях температури. Стрілкою вказано положення резонансної частоти МШГ. Зі зниженням температури спостерігається зсув

мод за частотною шкалою в бік збільшення значень резонансних частот.

5. Аналіз температурної зміни діелектричних втрат. На рис. 9 наведено результати температурної зміни тангенса кута втрат для деяких досліджених зразків, зазначених у табл. 1 (Si:Au, CVD-алмаз, APJ-алмаз, Al_2O_3). Експериментальні дані позначено точками. У цілому, як видно з рис. 9, спостерігається немонотонний характер отриманих залежностей.

Як зазначено в роботі [14], для апроксимації даних загальні втрати в діелектрику можна

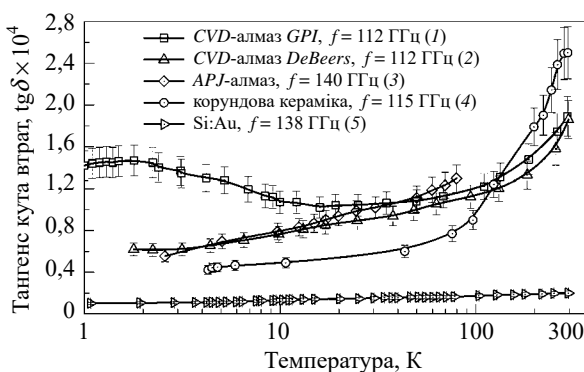


Рис. 9. Експериментальні залежності тангенса кута діелектричних втрат від температури для досліджуваних зразків: CVD-алмазу GPI на частоті 112 ГГц (1); CVD-алмазу De Beers на частоті 112 ГГц (2); APJ-алмазу на частоті 140 ГГц (3); Al_2O_3 на частоті 115 ГГц (4); Si:Au на частоті 138 ГГц (5)

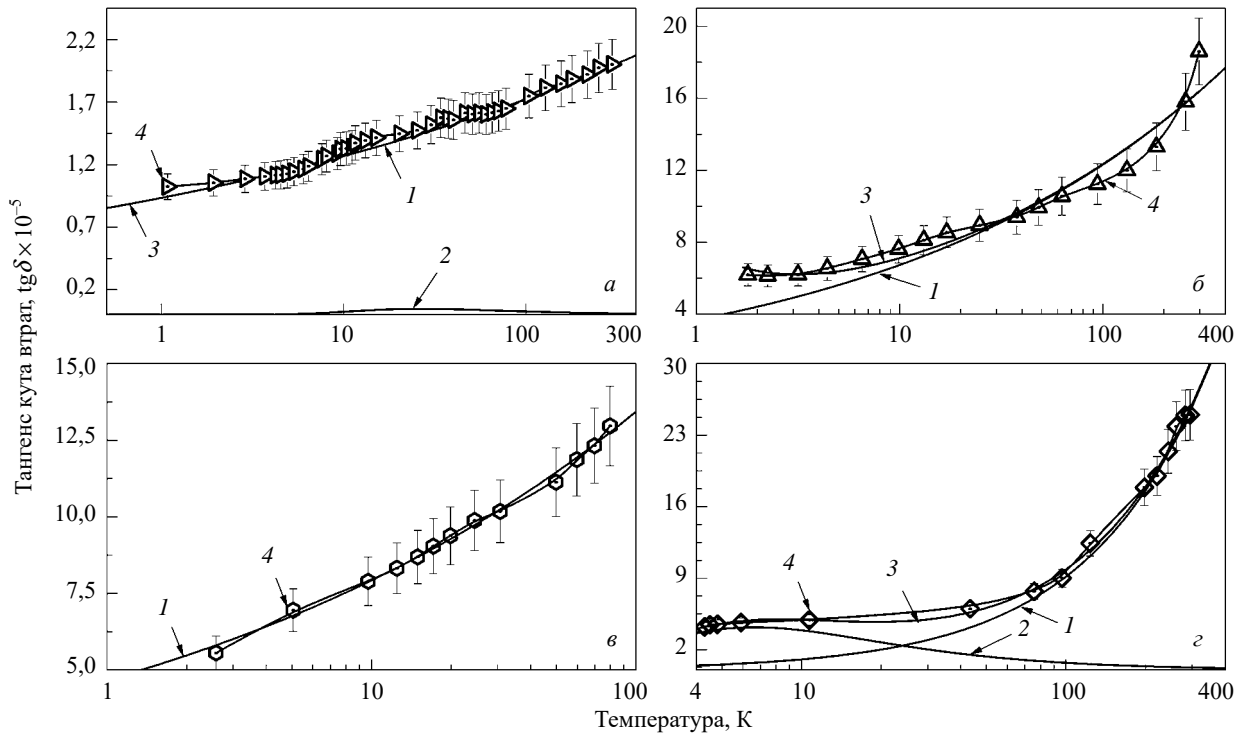


Рис. 10. Залежності тангенса кута діелектричних втрат від температури, отримані експериментально і шляхом моделювання, для зразків: а – Si:Au на частоті 138 ГГц; б – CVD-алмазу De Beers на частоті 112 ГГц; в – APJ-алмазу на частоті 140 ГГц; з – Al₂O₃ на частоті 115 ГГц

зобразити у вигляді суми власних (багатоквантових) $\text{tg } \delta_q$ і невласних (квазідебаєвських) $\text{tg } \delta_{db}$ втрат:

$$\text{tg } \delta_{\Sigma} \approx \text{tg } \delta_q + \text{tg } \delta_{db} \approx F A T^p + (1 - F) \frac{C_1}{T} \frac{\omega \tau}{\omega^2 \tau^2}, \quad (3)$$

де F – коефіцієнт, що характеризує роль відносного внеску кожного механізму втрат, $0 \leq F \leq 1$;

A – коефіцієнт пропорційності, що залежить від властивостей матеріалу [1]; p – показник, що характеризує ангармонізм коливань, який визначається виглядом кристалічної ґратки; T – температура; C_1 – величина, що залежить від концентрації диполів домішок; ω – циклічна частота, $\omega = 2\pi f$, f – частота; τ – час релаксації диполів, $\tau = \tau_0 \exp(W/k_B T)$, де τ_0 – час релаксації диполів за високої температури, W – енергія активації диполів, k_B – стала Больцмана.

Таблиця 2. Характеристики досліджених зразків

Параметр	Кремній, легований золотом, Si:Au	CVD-алмаз De Beers	APJ-алмаз	Корундова кераміка, Al ₂ O ₃
Частота дослідження зразка, ГГц	138	112	140	115
Коефіцієнт пропорційності, A	$9,34 \cdot 10^{-6}$	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$4,67 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$
Показник степеня, що характеризує ангармонізм коливань кристалічної ґратки, p	0,13	0,26	0,23	0,94
Час релаксації диполів, τ_0 , с	$7,63 \cdot 10^{-10}$	$1,37 \cdot 10^{-12}$	$5,92 \cdot 10^{-13}$	$1,92 \cdot 10^{-10}$
Енергія активація диполів, W , еВ	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-4}$	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$5,72 \cdot 10^{-4}$
Величина, яка залежить від концентрації диполів, C_1	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$3,58 \cdot 10^{-4}$	$9,99 \cdot 10^{-2}$
Мінімальне зареєстроване значення тангенса кута втрат $\text{tg } \delta_{\min}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$6,13 \cdot 10^{-5}$	$5,56 \cdot 10^{-5}$	$4,21 \cdot 10^{-5}$
Максимальне зареєстроване значення тангенса кута втрат $\text{tg } \delta_{\max}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$

На рис. 10 лініями 1–3 показано апроксимаційні залежності, отримані із застосуванням феноменологічного моделювання залежностей втрат на підставі виразу (3), точками 4 – дані експерименту. Отримані величини, що характеризують власні і невластні втрати, вказано в табл. 2 відповідно як A , p і τ_0 , W , C_1 . Немонотонний характер залежностей втрат у корундовій кераміці свідчить, найбільш ймовірно, про вплив включень домішок у цей зразок. На характер аналогічної залежності втрат для Si:Au, CVD- і APJ-алмазів та її немонотонність можуть впливати також напівпровідникові властивості даних зразків. У цілому на досліджених зразках показано прояв багатоквантового механізму ґраткових втрат (ступенева залежність), відповідальних за фундаментальні (власні) втрати в матеріалах (залежність позначено лінією 1).

Однак немонотонний характер і невисоке значення показника ступеневої залежності p загальних втрат (залежність 3) у порівнянні з результатами деяких інших робіт (наприклад, [42]) вказують, на наш погляд, на прояв у досліджених зразках внеску механізмів, пов'язаних з домішковими (дебаєвськими, або невластними) втратами (залежність 2) і, найімовірніше, для зразків Si:Au, CVD- і APJ-алмазів з напівпровідниковим характером переносу заряду. Характер залежності для CVD-алмазу *De Beers* якісно відповідає даним [43] для зразка, виготовленого за цією ж технологією.

Висновки. У роботі представлено результати експериментального дослідження тем-

пературної залежності діелектричних втрат деяких слабопоглинаючих напівпровідникових та діелектричних матеріалів на частотах 110...140 ГГц в області температур 4,2...300 К.

Продемонстровано особливості конструкції розробленого програмно-керованого вимірювального блока зі спектральною роздільною здатністю близько 0,1 МГц і можливістю заміни ЛЗХ у діапазоні частот 34...144 ГГц для застосування в низькотемпературному діелектрометрі.

Вимірювальний блок також може бути використаний як незалежне кероване джерело випромінювання та включений у систему синтезу частоти з фазовим автопідстроюванням.

Проаналізовано температурну залежність втрат у зразках слабопоглинаючих матеріалів з тангенсом кута втрат менше 10^{-4} : корундовій кераміці на основі Al_2O_3 ; кремнії, легovanому золотом (Si:Au); алмазі, вирощеному при осадженні з газової фази (CVD-алмаз); алмазі, вирощеному з використанням дугового плазмового струменя (APJ-алмаз).

На підставі аналізу отриманих результатів проведено оцінку внеску основних механізмів діелектричних втрат, ступеня впливу домішкових включень і носіїв заряду в загальні втрати.

Малі значення тангенса кута втрат та висока теплопровідність цих матеріалів вказують на доцільність їх застосування у НВЧ-електроніці у якості підкладок мікросхем та вікон введення-виведення енергії в мікрохвильових пристроях.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

- Gurevich V.L., Tagantsev A.K. Intrinsic dielectric loss in crystals. *Adv. Phys.* 1991. Vol. 40, Iss. 6. P. 719–767.
- Meriakri V.V., Chigryai E.E., Nikitin I.P. Dielectric properties of some practical-use materials in the low-frequency part of the terahertz band. *Proc. 2013 Int. Conf. Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*. (9–13 Sept. 2013 Sudak, Ukraine). P. 173–175. DOI: 10.1109/CAOL.2013.6657569.
- Garin B.M., Parshin V.V., Myasnikova S.E., Ralchenko V.G. Nature of millimeter wave losses in low loss CVD diamonds. *Diamond Relat. Mater.* 2003. Vol. 12, Iss. 10–11. P. 1755–1759. DOI: 10.1016/S0925-9635(03)00199-7.
- Raju G.G. *Dielectrics in Electric Fields*. 2nd ed. NY, USA: Crc Press-Taylor & Francis Group., 2017. 775 p. DOI: 10.1201/9781315373270.
- Raveendran A., Sebastian M.T., Raman S. Applications of microwave materials: a review. *J. Electron. Mater.* 2019. Vol. 48, Iss. 5. P. 2601–2634. DOI: 10.1007/s11664-019-07049-1.
- Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. *Kit Scientific Reports 7750*. Karlsruhe Institute of Technology KIT Scientific Publ. 2017. 183 p. URL: <https://www.ksp.kit.edu/1000081551>
- CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors*. Ed. R.S. Sussmann. John Wiley & Sons, Ltd. Publ. 2009. 596 p.
- Aiello G., Casal N., Gagliardi M., Goodman T., Henderson M., Meier A., Saibene G., Scherer T., Schreck S., Strauss D. Design evolution of the diamond window unit for the ITER EC H&CD upper launcher. *Fusion Eng. Des.* 2019. Vol. 146, Pt. A. P. 392–397. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.12.075.
- Krupka J., Derzakowski K., Tobar M., Hartnett J., Geyer R.G. Complex permittivity of some ultralow loss dielectric crystals at cryogenic temperatures. *Meas. Sci. Technol.* 1999. Vol. 10, Iss. 5. P. 387–392. DOI: 10.1088/0957-0233/10/5/308.

10. Le Floch J.M., Fan Y., Humbert G., Shan Q.X., Ferachou D., Bara-Maillet R., Aubourg M., Hartnett J.G., Madrangeas V., Cros D., Blondy J.M., Krupka J., Tobar M.E. Invited Article: Dielectric material characterization techniques and designs of high-Q resonators for applications from micro to millimeter-waves frequencies applicable at room and cryogenic temperatures. *Rev. Sci. Instrum.* 2014. Vol. 85, Iss. 3. P. 031301 (13 p.). DOI: 10.1063/1.4867461.
11. Barannik A., Cherpak N., Kirichenko A., Prokopenko Y., Vitusevich S., Yakovenko V. Whispering gallery mode resonators in microwave physics and technologies. *Int. J. Microwave Wireless Technol.* 2017. Vol. 9, Iss. 4. P. 781–796.
12. Головащенко Р.В., Деркач В.Н., Прокопенко Ю.В., Смирнова Т.А., Тарапов С.И., Филиппов Ю.Ф. О колебаниях в дисковых диэлектрических резонаторах. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* Харьков, 2006. Т. 11, № 3. С. 360–365.
13. Kirichenko A.Ya., Kogut A.Ye., Kutuzov V.V., Maksimchuk I.G., Nosatyuk S.O. Cavity method for determination of dielectric characteristics of fine granular materials in 8-mm range of wavelengths. *2010 20th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2010): proc.* (13–17 Sept. 2010, Sevastopol, Ukraine). Sevastopol: IEEE. P. 1012–1013. DOI: 10.1109/CRMICO.2010.5632775.
14. Головащенко Р.В., Деркач В.Н., Тарапов С.И. Микроволновые потери в слабопоглощающих алмазоподобных материалах при $1\text{ K} < T < 300\text{ K}$. Феноменологическое моделирование. *Радиофизика и электроника.* 2015. Т. 6(20), № 4. С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2015.04.031>.
15. Parshin V.V., Serov E.A., Bubnov G.M., Vdovin V.F., Koshelev M.A., Tretyakov M.Y. Cryogenic resonator complex. *Radiophys. Quantum Electron.* 2014. Vol. 56, Iss. 8–9. P. 554–560. DOI: 10.1007/s11141-014-9458-0.
16. Garin B.M., Lower loss limits at millimeter and terahertz ranges. *Infrared and Millimeter Waves, Conf. Digest of the 2004 Joint 29th Int. Conf. on 2004 and 12th Int. Conf. Terahertz Electronics, 2004* (Williamsburg, USA, 27 Sept.–1 Oct. 2004). Williamsburg, IEEE. P. 393–394. DOI: 10.1109/ICIMW.2004.1422127.
17. Garin B.M., Parshin V.V., Serov E.A., Jia C.C., Tang W.Z., Lu F.X. Electromagnetic properties at millimeter wavelength range of diamond films grown by DC arc plasma jet technique. *Proc. PIERS 2011 Suzhou: Progress in Electromagnetics Research Symposium.* 2011. P. 455–457. URL: <http://piers.org/pierspublications/PIERS2011SuzhouProceedings02.pdf>
18. Garin B.M., Polyakov V.I., Rukovishnikov A.I., Khomich A.V., Parshin V.V., Serov E.A., Jia C.C., Lu F.X., Tang W.Z. Dielectric loss at millimeter range and temperatures 300–950 K, and electrophysical properties in diamonds grown by the Arc Plasma Jet Technology. *Proc. PIERS 2014 Guangzhou.* China, 25–28 August 2014. P. 2096–2099. URL: <http://piers.org/pierspublications/PIERS2014GuangzhouProceedings03.pdf>
19. Andreev B.A., Kotereva T.V., Parshin V.V., Shmaginn V.B. Silicon with extremely low millimeter-wave dielectric loss. *Inorg. Mater.* 1997. Vol. 33, No. 11. P. 1100–1102.
20. Sebastian M.T., Krupka J., Arun S., Kim C.H., Kim H.T. Polypropylene-high resistivity silicon composite for high frequency applications. *Mater. Lett.* 2018. Vol. 232. P. 92–94. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.093.
21. Krupka J., Mouneyrac D., Hartnett J.G., Tobar M.E. Use of whispering-gallery modes and quasi-TE_{0np} modes for broadband characterization of bulk gallium arsenide and gallium phosphide samples. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2008. Vol. 56, Iss. 5. P. 1201–1206. DOI: 10.1109/TMTT.2008.921652.
22. Шкловский Б.И. Эфрос А.Л. *Электронные свойства легированных полупроводников.* М.: Наука, 1979. 416 с.
23. Sebastian M.T., Ubic R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties. *Int. Mater. Rev.* 2015. Vol. 60, Iss. 7. P. 392–412. DOI: 10.1179/1743280415Y.0000000007
24. Satoh D., Shibuya T., Ogawa H., Tanaka M., Kuroda R., Moric S., Yoshida M., Toyokawa H. Power efficiency enhancement of dielectric assist accelerating structure. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2019. Vol. 459. P. 148–152. DOI: 10.1016/j.nimb.2019.09.006.
25. Breeze J. *Temperature and Frequency Dependence of Complex Permittivity in Metal Oxide Dielectrics: Theory, Modelling and Measurement.* Springer, 2016. 167 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44547-2.
26. Derkach V.N., Golovashchenko R.V., Nedukh S.V., Plevako A.S., Tarapov S.I. Measurement of loss tangent of dielectric and semiconductor materials at millimeter waves and temperatures 0.9–300 K. *Digest Joint 30th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves & 13th Int. Conf. Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2005).* (19–23 Sept. 2005, Williamsburg, USA). 2005. P. 192–193. DOI: 10.1109/ICIMW.2005.1572473.
27. Barannik A.A., Prokopenko Y.V., Filipov Y.F., Cherpak N.T., Korotash I.V. Q-factor of a millimeter-wave sapphire disk resonator with conductive end plates. *Tech. Phys.* 2003. Vol. 48, Iss. 5. P. 621–625. DOI: 10.1134/1.1576479.
28. Krupka J. Precise measurements of the complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies. *Mater. Chem. Phys.* 2003. Vol. 79, Iss. 2–3. P. 195–198. DOI: 10.1016/S0254-0584(02)00257-2.
29. Krupka J., Hartnett J.G., Piersa M. Permittivity and microwave absorption of semi-insulating InP at microwave frequencies. *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98, Iss. 11. P. 112112 (3 p.). DOI: 10.1063/1.3570689.
30. Добромислов В.С., Кузнецов А.П. Расчет лейкосапфировых резонаторов с азимутальными колебаниями. *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.* 1987. № 6(400). С. 21–23.
31. Головащенко Р.В. Система возбуждения дискового диэлектрического резонатора в криодиэлектронном измерителе. *Радиофизика и электроника.* 2010. Т. 15, № 2. С. 27–31.
32. Derkach V.N., Golovashchenko R.V., Goroshko O.V., Varavin A.V., Plevako A.S. Hardware and software complex for MM-wave spectroscopic research. *2006 16th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2006).* (11–15 Sept. 2006, Sevastopol, Ukraine): proc. Sevastopol: IEEE. P. 817–818. DOI: 10.1109/CRMICO.2006.256215.
33. Derkach V.N., Golovashchenko R.V., Ostryzhnyi Y.M., Plevako A.S., Tarapov S.I., Alekseev E.A. Dielectric losses of high-resistivity semiconductor materials in EHF-band at cryogenic temperatures. *2016 9th Int. Kharkiv Symp. «Physics*

- and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves” (MSMW’2016): proc. (20–24 June 2016, Kharkiv, Ukraine). Kharkiv: IEEE. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538082.
34. Golovashchenko R.V., Plevako A.S., Ostryzhnyi Y.M., Derkach V.N., Meshcheryakov A.A., Alekseev E.A. High-resolution computer-controlled oscillator of 2-mm wave-range for the low temperature dielectrometer. *Ibid.* Kharkiv: IEEE. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538102.
35. *Experimental complex – National treasure of Ukraine*, 2005. URL: <http://www.ire.kharkov.ua/en/national-treasure.html>
36. Головащенко Р.В., Деркач В.Н., Заец Н.К., Корж В.Г., Плевако А.С., Тарапов С.И. Контроль и стабилизация температуры (0,8÷300 К) в криоэлектронном гигагерцевом диапазоне частот. *Радиофизика и электроника*. 2013. Т. 4(18), № 4. С. 92–98.
37. Golovashchenko R.V., Zaetz N.K., Ostryzhnyi Y.M., Plevako A.S., Derkach V.N. Precision temperature measurement unit for the low temperature dielectrometer. 2016 9th Int. Kharkiv Symp. “Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves” (MSMW’2016): proc. (20–24 June 2016, Kharkiv, Ukraine). Kharkiv: IEEE. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538104.
38. Алексеев Е.А., Мотиенко Р.А., Маргулес Л. Спектрометры миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе синтезаторов прямого цифрового синтеза. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2011. Т. 16, № 3. С. 313–327. URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/437>
39. Petkie D.T., Goyette T.M., Bettens R.P.A., Belov S.P., Albert S., Helming P., De Lucia F.C., A fast scan submillimeter spectroscopic technique. *Rev. Sci. Instrum.* 1997. Vol. 68, Iss. 4. P. 1675–1683. DOI: 10.1063/1.1147970.
40. Lewen F., Gendriesch R., Pak I., Paveliev D.G., Hepp M., Schieder R., Winnewisser G. Phase locked backward wave oscillator pulsed beam spectrometer in the submillimeter wave range. *Rev. Sci. Instrum.* 1998. Vol. 69, Iss. 1. P. 32–39. DOI: 10.1063/1.1148475.
41. *Microconverter 12-bit ADCs and DACs with embedded high speed 62 kB flash MCU, ADuC841/ADuC842/ADuC843*, Data Sheet. URL: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC841_842_843.pdf
42. Molla J., Vila R., Heidinger R., Ibarra A. Radiation effects on dielectric losses of Au-doped silicon. *J. Nucl. Mater.* 1998. Vol. 258–263. P. 1884–1888. DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00131-7.
43. Le Floch J.-M., Bara R., Hartnett J.G., Tobar M.E., Mouneyrac D., Passerieux D., Cros D., Krupka J., Goy P., Caroopen S. Electromagnetic properties of polycrystalline diamond from 35 K to room temperature and microwave to terahertz frequencies. *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109, Iss. 9. P. 094103 (6 p.). DOI: 10.1063/1.3580903.

Стаття надійшла 27.12.2019

REFERENCES

- Gurevich, V.L., Tagantsev, A.K., 1991. Intrinsic dielectric loss in crystals. *Adv. Phys.*, **40**(6), pp. 719–767. DOI: 10.1080/00018739100101552.
- Meriakri, V.V., Chigryai, E.E., Nikitin, I.P., 2013. Dielectric properties of some practical-use materials in the low-frequency part of the terahertz band. In: *Proc. 2013 Int. Conf. Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*. Sudak, Ukraine, 9–13 Sept. 2013, pp. 173–175. DOI: 10.1109/CAOL.2013.6657569.
- Garin, B.M., Parshin, V.V., Myasnikova, S.E., Ralchenko, V.G., 2003. Nature of millimeter wave losses in low loss CVD diamonds. *Diamond Relat. Mater.*, **12**(10–11), pp. 1755–1759. DOI: 10.1016/S0925-9635(03)00199-7.
- Raju, G.G., 2017. *Dielectrics in Electric Fields*. 2nd ed. NY, USA: Crc Press-Taylor & Francis Group. DOI: 10.1201/9781315373270.
- Raveendran, A., Sebastian, M.T., Raman, S., 2019. Applications of microwave materials: a review. *J. Electron. Mater.*, **48**(5), pp. 2601–2634. DOI: 10.1007/s11664-019-07049-1.
- Thumm, M., 2017. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. *Kit Scientific Reports 7750*. [online]. Karlsruhe Institute of Technology KIT Scientific Publ. Available from: <https://www.ksp.kit.edu/1000081551>
- Sussmann, R.S. ed., 2009. *CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors*. John Wiley & Sons, Ltd., Publ. DOI: 10.1002/9780470740392.
- Aiello, G., Casal, N., Gagliardi, M., Goodman, T., Henderson, M., Meier, A., Saibene, G., Scherer, T., Schreck, S., Strauss, D., 2019. Design evolution of the diamond window unit for the ITER EC H&CD upper launcher. *Fusion Eng. Des.*, **146**, Pt. A, pp. 392–397. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.12.075.
- Krupka, J., Derzakowski, K., Tobar, M., Hartnett, J., Geyer, R.G., 1999. Complex permittivity of some ultralow loss dielectric crystals at cryogenic temperatures. *Meas. Sci. Technol.*, **10**(5), pp. 387–392. DOI: 10.1088/0957-0233/10/5/308.
- Le Floch, J.M., Fan, Y., Humbert, G., Shan, Q.X., Ferachou, D., Bara-Maillet, R., Aubourg, M., Hartnett, J.G., Madrangeas, V., Cros, D., Blondy, J.M., Krupka, J., Tobar, M.E., 2014. Invited Article: Dielectric material characterization techniques and designs of high-Q resonators for applications from micro to millimeter-waves frequencies applicable at room and cryogenic temperatures. *Rev. Sci. Instrum.*, **85**(3), pp. 031301 (13 p.). DOI: 10.1063/1.4867461.
- Barannik, A., Cherpak, N., Kirichenko, A., Prokopenko, Y., Vitusevich, S., Yakovenko, V., 2017. Whispering gallery mode resonators in microwave physics and technologies. *Int. J. Microwave Wireless Technol.*, **9**(4), pp. 781–796. DOI: 10.1017/S1759078716000787.
- Golovashchenko, R.V., Derkach, V.N., Prokopenko, Yu.V., Smirnova, T.A., Tarapov, S.I., Filippov, Yu.F., 2006. On oscillations in disk dielectric resonators. In: V.M. Yakovenko, ed. 2006. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **11**(3), pp. 360–365 (in Russian).
- Kirichenko, A.Ya., Kogut, A.Ye., Kutuzov, V.V., Maksimchuk, I.G., Nosatyuk, S.O., 2010. Cavity method for determination of dielectric characteristics of fine granular materials in 8-mm range of wavelengths. In: 2010 20th Int. Crimean Conf.

- "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2010): proc. Sevastopol, Ukraine, 13–17 Sept. 2010. Sevastopol: IEEE. DOI: 10.1109/CRMICO.2010.5632775.
14. Golovashchenko, R.V., Derkach, V.N., Tarapov, S.I., 2015. Microwave loss in low-absorption diamond-like materials at $1\text{ K} < T < 300\text{ K}$. The phenomenological simulation. *Radiofiz. Elektron.*, **20**(4), pp. 31–38 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2015.04.031>.
 15. Parshin, V.V., Serov, E.A., Bubnov, G.M., Vdovin, V.F., Koshelev, M.A., Tretyakov, M.Y., 2014. Cryogenic resonator complex. *Radiophys. Quantum Electron.*, **56**(8–9), pp. 554–560. DOI: 10.1007/s11141-014-9458-0.
 16. Garin, B.M., 2005. Lower loss limits at millimeter and terahertz ranges. In: *Infrared and Millimeter Waves, Conf. Digest of the 2004 Joint 29th Int. Conf. on 2004 and 12th Int. Conf. Terahertz Electronics, 2004*. Williamsburg, USA, 27 Sept.–1 Oct. 2004. Williamsburg: IEEE, pp. 393–394. DOI: 10.1109/ICIMW.2004.1422127.
 17. Garin, B.M., Parshin, V.V., Serov, E.A., Jia, C.C., Tang, W.Z., Lu, F.X., 2011. Electromagnetic properties at millimeter wavelength range of diamond films grown by DC arc plasma jet technique. [pdf]. In: *Proc. PIERS 2011 Suzhou: Progress in Electromagnetics Research Symp.* 2011, pp. 455–457. Available from: <http://piers.org/pierspublications/PIERS2011SuzhouProceedings02.pdf>
 18. Garin, B.M., Polyakov, V.I., Rukovichnikov, A.I., Khomich, A.V., Parshin, V.V., Serov E.A., Jia, C.C., Lu, F.X., Tang, W.Z., 2014. Dielectric loss at millimeter range and temperatures 300–950 K, and electrophysical properties in diamonds grown by the Arc Plasma Jet Technology. [pdf]. In: *Proc. PIERS 2014 Guangzhou*. China, 25–28 August 2014, pp. 2096–2099. Available from: <http://piers.org/pierspublications/PIERS2014GuangzhouProceedings03.pdf>
 19. Andreev, B.A., Kotereva, T.V., Parshin, V.V., Shmaginn, V.B., 1997. Silicon with extremely low millimeter-wave dielectric loss. *Inorg. Mater.*, **33**(11), pp. 1100–1102.
 20. Sebastian, M.T., Krupka, J., Arun, S., Kim, C.H., Kim, H.T., 2018. Polypropylene-high resistivity silicon composite for high frequency applications. *Mater. Lett.*, **232**, pp. 92–94. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.093.
 21. Krupka, J., Mouneyrac, D., Hartnett, J.G., Tobar, M.E., 2008. Use of whispering-gallery modes and quasi-TE_{0np} modes for broadband characterization of bulk gallium arsenide and gallium phosphide samples. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **56**(5), pp. 1201–1206. DOI: 10.1109/TMTT.2008.921652.
 22. Shklovsky, B.I., Efros, A.L., 1979. *Electronic properties of doped semiconductors*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
 23. Sebastian, M.T., Ubig, R., Jantunen, H., 2015. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties. *Int. Mater. Rev.*, **60**(7), pp. 392–412. DOI: 10.1179/1743280415Y.0000000007.
 24. Satoh, D., Shibuya T., Ogawa, H., Tanaka, M., Kuroda, R., Moric, S., Yoshida, M., Toyokawa, H., 2019. Power efficiency enhancement of dielectric assist accelerating structure. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **459**, pp. 148–152. DOI: 10.1016/j.nimb.2019.09.006.
 25. Breeze, J., 2016. *Temperature and Frequency Dependence of Complex Permittivity in Metal Oxide Dielectrics: Theory, Modelling and Measurement*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-44547-2.
 26. Derkach, V.N., Golovashchenko, R.V., Nedukh, S.V., Plevako, A.S., Tarapov, S.I., Measurement of loss tangent of dielectric and semiconductor materials at millimeter waves and temperatures 0.9–300 K. In: *Digest Joint 30th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves & 13th Int. Conf. Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2005)*. Williamsburg, USA, 19–23 Sept. 2005, pp. 192–193. DOI: 10.1109/ICIMW.2005.1572473.
 27. Barannik, A.A., Prokopenko, Y.V., Filipov, Y.F., Cherpak, N.T., Korotash, I.V., 2003. Q-factor of a millimeter-wave sapphire disk resonator with conductive end plates. *Tech. Phys.*, **48**(5), pp. 621–625. DOI: 10.1134/1.1576479.
 28. Krupka, J., 2003. Precise measurements of the complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies. *Mater. Chem. Phys.*, **79**(2–3), pp. 195–198. DOI: 10.1016/S0254-0584(02)00257-2.
 29. Krupka, J., Hartnett, J.G., Piersa, M., 2011. Permittivity and microwave absorption of semi-insulating InP at microwave frequencies. *Appl. Phys. Lett.*, **98**(11), pp. 112112–1–3. DOI: 10.1063/1.3570689.
 30. Dobromyslov, V.S., Kuznetsov, A.P., 1987. Calculation of sapphire resonators with azimuthal oscillations. *Electronic Engineering. Ser. Microwave Electronics*, **6**(400), pp. 21–23 (in Russian).
 31. Golovashchenko, R.V., 2010. Excitation system of a disk dielectric resonator in the cryodielectrometer. *Radiofiz. Elektron.*, **15**(2), pp. 27–31 (in Russian).
 32. Derkach, V.N., Golovashchenko, R.V., Goroshko, O.V., Varavin, A.V., Plevako, A.S., 2006. Hardware and software complex for MM-wave spectroscopic research, In: *Proc. 2006 16th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2006)*. Sevastopol, Ukraine, 11–15 Sept. 2006, pp. 817–818. Sevastopol, IEEE. DOI: 10.1109/CRMICO.2006.256215.
 33. Derkach, V.N., Golovashchenko, R.V., Ostryzhnyi, Y.M., Plevako, A.S., Tarapov, S.I., Alekseev, E.A., 2016. Dielectric losses of high-resistivity semiconductor materials in EHF-band at cryogenic temperatures. In: *Proc. 2016 9th Int. Kharkiv Symp. "Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves" (MSMW'2016)*. Kharkiv, Ukraine, 20–24 June 2016. Kharkiv: IEEE. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538082.
 34. Golovashchenko, R.V., Plevako, A.S., Ostryzhnyi, Y.M., Derkach, V.N., Meshcheryakov, A.A., Alekseev, E.A. 2016. High-resolution computer-controlled oscillator of 2-mm wave-range for the low temperature dielectrometer. In: *Ibid.* DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538102.
 35. *Experimental complex – national treasure of Ukraine*, 2005. Available from: <http://www.ire.kharkov.ua/en/national-treasure.html>
 36. Golovashchenko, R.V., Derkach, V.N., Zaetz, M.K., Korzh, V.G., Plevako, A.S., Tarapov, S.I., 2013. Control and stabilization of temperature (0.8÷300 K) in the cryodielectrometer of the gigahertz frequency band. *Radiofiz. Elektron.*, **18**(4), pp. 92–98 (in Russian).

37. Golovashchenko, R.V., Zaetz, N.K., Ostryzhnyi, Y.M., Plevako, A.S., Derkach, V.N., 2016. Precision temperature measurement unit for the low temperature dielectrometer. In: *Proc. 2016 9th Int. Kharkiv Symp. "Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves"* (MSMW'2016). Kharkiv, Ukraine, 20–24 June 2016. Kharkiv: IEEE. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538104.
38. Alekseev, E.A., Motienko, R.A., Margules, L., 2011. Millimeter and submillimeter spectrometers based on direct digital synthesis synthesizers. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **16**(3), pp. 313–327 (in Russian). Available from: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/437>
39. Petkie, D.T., Goyette, T.M., Bettens, R.P.A., Belov, S.P., Albert, S., Helminger, P., De Lucia, F.C., 1997. A fast scan submillimeter spectroscopic technique. *Rev. Sci. Instrum.*, **68**(4), pp. 1675–1683. DOI: 10.1063/1.1147970.
40. Lewen, F., Gendriesch, R., Pak, I., Paveliev, D.G., Hepp, M., Schieder, R., Winnewisser, G., 1998. Phase locked backward wave oscillator pulsed beam spectrometer in the submillimeter wave range. *Rev. Sci. Instrum.*, **69**(1), pp. 32–39. DOI: 10.1063/1.1148475.
41. *Microconverter 12-bit ADCs and DACs with embedded high speed 62 kB flash MCU, ADuC841/ADuC842/ADuC843*, Data Sheet. Available from: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC841_842_843.pdf
42. Molla, J., Vila, R., Heidinger, R., Ibarra, A., 1998. Radiation effects on dielectric losses of Au-doped silicon. *J. Nucl. Mater.*, **258-263**, Pt. 2, pp. 1884–1888. DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00131-7.
43. Le Floch, J.-M., Bara, R., Hartnett, J.G., Tobar, M.E., Mouneyrac, D., Passerieux, D., Cros, D., Krupka, J., Goy, P., Caroopen, S., 2011. Electromagnetic properties of polycrystalline diamond from 35 K to room temperature and microwave to terahertz frequencies. *J. Appl. Phys.*, **109**(9), pp. 094103 (6 p.). DOI: 10.1063/1.3580903.

Received 27.12.2019

V.N. Derkach¹, E.A. Alekseev^{2,3}, R.V. Golovashchenko¹,
Ye.M. Ostryzhnyi¹, A.A. Meshcheryakov², S.I. Tarapov^{1,3,4}

¹O.Ya. Usikov IRE of NASU

12, Akad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

²Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine

4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

³V.N.Karazin Kharkiv National University

4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

⁴Kharkiv National University of Radio Electronics

14, Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine

A LOW TEMPERATURE STUDY

OF ELECTROMAGNETIC ENERGY LOSS IN LOW-LOSS MATERIALS IN THE 110...140 GHz FREQUENCY RANGE

Subject and Purpose. The subject of the study is spectral and energy characteristics of whispering-gallery disk resonators made up of low-loss microwave dielectric and semiconductor materials, namely, gold-doped silicon Si:Au, Chemical Vapor Deposition (CVD) diamond, Arc Plasma Jet (APJ) diamond, and alumina ceramics Al₂O₃. On the basis of the temperature dependences of the microwave energy loss in the materials mentioned, we seek to classify the loss contributions among the electromagnetic energy absorption mechanisms and find physical parameters responsible for these mechanisms.

Methods and Methodology. The loss values were experimentally obtained by the whispering-gallery disk resonator technique with the usage of a cryodielectrometer. A phenomenological simulation was performed to classify the loss contributions to the temperature dependence of electromagnetic energy absorption among the major loss mechanisms in the examined materials.

Results. The experimental study results on the dielectric loss temperature dependence within 4.2...300 K have been presented and discussed for low-loss semiconductor and dielectric materials, including gold-doped silicon Si:Au, CVD-diamond, APJ-diamond, and alumina ceramics Al₂O₃ with reference to the frequency band 110...140 GHz. Certain design features have been suggested to use in the authors' software-controlled measuring unit to provide the interchangeability of backward wave tubes (BWT) inside the cryodielectrometer and extend the measuring bandwidth up to 34...144 GHz. The unit offers software-controlled frequency tuning with a spectral resolution of about 0.1 MHz. The loss contributions have been classified among the major loss mechanisms, and physical constitutive parameters responsible for these mechanisms have been determined.

Conclusion. The temperature dependences of dielectric loss in low-absorption materials have been registered and analysed. The developed measuring unit has advantageous design features and provides, in addition, an independent controllable radiation source which can be included in a frequency synthesis system with phase-locked loop.

Key words: disk dielectric resonator, whispering gallery modes, low-loss dielectric, high-resistance semiconductor, cryogenic temperatures, low-temperature dielectrometry, millimeter waves.