

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-34>

УДК 621.396.96:621.372.82:621.315.592

ОЛІЙНИК Сергій

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

e-mail: sergey.oliynick@khai.edu

<https://orcid.org/0000-0001-6073-8531>

ЧУГАЙ Олег

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

e-mail: chugai@xai.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0002-2857-6592>

ОДОКІЄНКО Олексій

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

e-mail: o.odokiienko@khai.edu

<https://orcid.org/0000-0002-5227-1000>

МАЛАСХТА Павло

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

e-mail: p.p.malashta@khai.edu

<https://orcid.org/0009-0000-2652-1507>

ДЕНИСЮК Тарас

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0009-0000-8817-9011>

e-mail: t.y.denysiuk@khai.edu

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ SIW – ХВИЛЕВОДІВ НА КРИСТАЛАХ $A^{II}B^{VI}$ ДЛЯ РАДАРІВ PCA

На сьогодні питання проектування та виготовлення малогабаритних радарів PCA для БПЛА та радіотехнічних систем фантомізації радіозображень космічних радарів PCA на основі вітчизняної елементної бази є надзвичайно важливим для підрозділів сектору безпеки і оборони України. Розвиток цього напрямку стримується відсутністю мініатюрної вітчизняної елементної бази для НВЧ-пристроїв діапазону 1 – 100 ГГц. Технологія SIW – це сучасний, перспективний напрямок створення НВЧ-компонентів, які формуються на об'ємному діелектричному матеріалі. При цьому чим вище діелектрична проникність такого матеріалу, тим менші розміри SIW-компонентів. Кристали $A^{II}B^{VI}$ мають досить високе значення діелектричної проникності в інтервалі 5 – 10 і, за умови низької концентрації в них структурних дефектів, їх $\text{tg}\delta$ знаходиться на рівні 0,001 – 0,01. Зазначені параметри роблять кристали $A^{II}B^{VI}$ перспективними для створення SIW-хвильоводів. Наразі, у світовій науковій літературі відсутні публікації щодо дослідження SIW-хвильоводів на основі кристалів $A^{II}B^{VI}$. Отже, об'єкт дослідження – це процес формування теоретичних основ розробки SIW – хвильоводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для радарів PCA. Предмет дослідження – модель SIW – хвильоводу у Ansys HFSS, сформована на основі моделі діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ в мікрохвильовому діапазоні. Метою роботи є формування теоретичних основ розробки SIW – хвильоводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для радарів PCA. Отримано такі результати: синтезовано модель діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ в діапазоні 1 – 100 ГГц; виконано оцінку величин реальної та уявної компонент комплексної діелектричної проникності кристалів $A^{II}B^{VI}$ в діапазоні частот 1 – 100 ГГц; розраховано параметри SIW – хвильоводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для частот 1, 50 та 100 ГГц; в симуляторі Ansys HFSS створено модель SIW – хвильоводу на кристалі ZnS для робочої частоти 1 ГГц та отримано частотну залежність S-параметрів хвильоводу. Висновок: В роботі вперше створено теоретичні основи розробки SIW – хвильоводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для радарів PCA. Критичний аналіз отриманих результатів свідчить про те, що розробка SIW-компонентів на основі кристалів $A^{II}B^{VI}$ має великий потенціал реалізації, але потребує подальших комплексних досліджень: теоретичних, експериментальних і технологічних.

Ключові слова: SIW – хвильовод; кристали $A^{II}B^{VI}$; діелектрична проникність; коефіцієнт діелектричних втрат; S-параметри; радар PCA.

OLIYNICK Serhii, CHUGAI Oleg,
ODOKIENKO Oleksii, MALASHTA Pavlo, DENYSYUK Taras
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SIW – WAVEGUIDES ON $A^{II}B^{VI}$ CRYSTALS FOR SAR RADARS

The issue of designing and manufacturing small-sized SAR radars for UAVs and radio engineering systems for phantomizing radio images of SAR space radars based on domestic element base is crucial today for the security and defense sectors of Ukraine. The development of this direction is hampered by the lack of a miniature domestic element base for microwave devices in the 1-100 GHz range. SIW technology is a modern and promising direction for creating microwave components formed on a bulk dielectric material. The higher the dielectric constant of such a material, the smaller the dimensions of SIW components. $A^{II}B^{VI}$ crystals have a relatively high dielectric constant in the range of 5-10, and, provided that the concentration of structural defects is low, their $\text{tg}\delta$ is at the level of 0.001-0.001. These parameters make $A^{II}B^{VI}$ crystals promising for creating SIW waveguides. Currently, there are no publications on the study of SIW waveguides based on $A^{II}B^{VI}$ crystals in the world's scientific literature. Therefore, the object of the study is the process of forming the theoretical foundations of the development of SIW waveguides on $A^{II}B^{VI}$ crystals for SAR radars. The subject of the study is the SIW waveguide model in Ansys HFSS, which is based on the model of dielectric parameters of $A^{II}B^{VI}$ crystals in the microwave range. The aim of the work is to form the theoretical foundations of the development of SIW waveguides

on $A^{II}B^{VI}$ crystals for SAR radars. The following results were obtained: a model of dielectric parameters of $A^{II}B^{VI}$ crystals in the range of 1 - 100 GHz was synthesized; the values of the real and imaginary components of the complex dielectric permittivity of $A^{II}B^{VI}$ crystals in the frequency range of 1 - 100 GHz were estimated; the parameters of SIW waveguides on $A^{II}B^{VI}$ crystals for frequencies of 1, 50 and 100 GHz were calculated; In the Ansys HFSS simulator, a model of an SIW waveguide on a ZnS crystal for an operating frequency of 1 GHz was created and the frequency dependence of the S-parameters of the waveguide was obtained. Conclusion: The paper first created the theoretical foundations for the development of SIW waveguides on $A^{II}B^{VI}$ crystals for SAR radars. A critical analysis of the results obtained indicates that the development of SIW components based on $A^{II}B^{VI}$ crystals has excellent potential, but requires further comprehensive research, including theoretical, experimental, and technological aspects.

Keywords: SIW – waveguide; $A^{II}B^{VI}$ crystals; dielectric constant; dielectric loss factor; S-parameters; SAR radar.

Стаття надійшла до редакції / Received 05.11.2025

Прийнята до друку / Accepted 07.12.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Впродовж останніх років суттєво зросла увага до питань розробки, виробництва та застосування БПЛА в різних сферах [1]. Виконання місій такими апаратами нерідко пов'язано з необхідністю аерофотозйомки місцевості. Для цього в Україні найбільш часто використовують прилади видимої області оптичного діапазону, для яких суттєву перешкоду становлять такі атмосферні явища, як хмари, туман, сніг, дощ і т.п. При цьому прилади формування радіозображень типу радарів із синтезованою апертурою (РСА) майже не використовуються, хоча зазначені перешкоди є переважно прозорими у мікрохвильовому діапазоні [2].

Розвиток і впровадження бортових радарів для сучасних БПЛА стримується, в першу чергу, габаритами і масою такого обладнання. Так, для найбільш вживаних сьогодні діапазонів частот (L, S, C та X – діапазони) маса радарів може сягати десятки – сотні кілограм а розміри антени – одиниці – десятки метрів [3]. Зазначимо, що РЛС для БПЛА X та Ku діапазону були розроблені і сьогодні випускаються в США, Європі, Туреччині, Ізраїлі, КНР та Росії, але їх маса також складає десятки кілограм [4]. Слід додати, що новітньою розробкою українських вчених став прототип бортового радару РСА для БПЛА у W-діапазоні мікрохвильовою масою до 5 кг з використанням вітчизняної елементної бази [5].

Розробка та використання малогабаритних бортових радарів РСА для БПЛА в Україні стикається ще з однією проблемою – відсутністю серійного вітчизняного виробництва мініатюрних НВЧ електронних компонентів. Зрозуміло, що розміри і маса зазначених компонентів визначають габарити та вагу самого радару. Суттєво, що в останніх сучасних розробках, зокрема як у [5], все ще використовують класичні вітчизняні металеві НВЧ хвильоводні компоненти.

Ще одним важливим для нашої країни напрямком сьогодні є розробка та виготовлення вітчизняних радарів фантомізації радіозображень космічних РСА [6], які, зазвичай, працюють в мікрохвильових діапазонах L, C та X. Виготовлення таких новітніх радіотехнічних систем також потребує розробки вітчизняних мініатюрних НВЧ електронних компонентів для зменшення втрат сигналу та паразитного випромінювання, швидкого і високоточного контролю фази сигналу, розширення смуги пропускання і т.д.

Отже, розробка вітчизняних мініатюрних НВЧ-компонентів для виготовлення бортових радарів сучасних БПЛА та радарів фантомізації радіозображень космічних РСА є актуальною.

В сучасній НВЧ-техніці використовують наступні типи електронних компонентів: класичні металеві хвильоводи прямокутного або круглого перерізу, мікросмужкові лінії (microstrip line), компланарні хвильоводи (CPW – coplanar waveguides) та SIW – компоненти (substrate integrated waveguide). Класичні НВЧ-компоненти типу порожнистих металевих хвильоводів є громіздкими, дорогими у виготовленні, їх складно інтегрувати з планарними НВЧ-схемами. До переваг мікросмужкових НВЧ-компонентів відносять: компактність, низьку вартість, простоту виготовлення, легкість інтегрування з активними компонентами. Проте мікросмужковим НВЧ-лініям властива низька ефективність внаслідок значних втрат енергії через випромінювання та поверхневі хвилі особливо на високих частотах мікрохвильового діапазону та за умови товстих діелектричних основ [7, 8].

Компланарні хвильоводи характеризуються простотою виготовлення, простотою інтеграції з планарними НВЧ-структурами та широким частотним діапазоном. В той же час CPW мають втрати через поверхневі хвилі, що особливо проявляється на високих частотах, відзначаються чутливістю до суміжних компонентів та допусків виготовлення, потребують більших площ для формування порівняно з SIW – компонентами [9].

SIW – це сучасна НВЧ-технологія, яка поєднує переваги класичних хвильоводів та планарних НВЧ-конструкцій проте характеризується низькими втратами завдяки пригніченню поверхневих хвиль [10]. Важливо, що дана технологія дозволяє формувати декілька НВЧ – блоків на одній діелектричній підкладці. Основними матеріалами діелектричних підкладок SIW-компонентів на сьогодні є Rogers (RO4000/RT/Duroid), Teflon/PTFE композити та Flame Retardant 4. Важливо, що в міліметровому діапазоні кристали $A^{II}B^{VI}$ володіють більшою у декілька разів діелектричною проникністю в міліметровому діапазоні (наприклад, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdTe) порівняно з зазначеними матеріалами [11, 12], що дає можливість створювати у декілька

разів менші за розмірами SIW-компоненти. До того ж, такі кристали $A^{II}B^{VI}$, як ZnSe характеризуються високою теплопровідністю, що необхідно для ефективного відведення тепла у потужних радарів та низькими втратами на НВЧ. Проте у світовій науковій літературі відсутні роботи щодо формування SIW-компонентів на основі кристалів $A^{II}B^{VI}$. Таким чином, актуальним є створення теоретичних основ формування SIW – компонентів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для радарів РСА.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є формування теоретичних основ розробки SIW – хвилеводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для радарів РСА.

Методами дослідження є математичне моделювання діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ в діапазоні 1 – 100 ГГц, математичне моделювання геометричних параметрів SIW – хвилеводу, моделювання електродинамічних параметрів SIW – хвилеводу в симуляторі Ansys HFSS.

Математична модель діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ ґрунтується на узагальненій моделі лінійного діелектричного відгуку, яка враховує внески електронної поляризації, релаксаційних процесів за участі дефектів структури та електропровідності. До того ж використано модель універсального діелектричного відгуку Джоншера. Моделювання геометричних параметрів SIW – структур виконувалось на основі рівнянь з [10, 13].

Для досягнення мети треба було вирішити наступні задачі:

- сформувати модель діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ в діапазоні 1 – 100 ГГц;
- виконати оцінку величин реальної та уявної компонент комплексної діелектричної проникності кристалів $A^{II}B^{VI}$ в діапазоні 1 – 100 ГГц;
- розрахувати геометричні параметри SIW – хвилеводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для частот 1, 50 та 100 ГГц;
- за допомогою симулятора Ansys HFSS виконати моделювання електродинамічних параметрів SIW – хвилеводу на кристалі ZnS для частоти 1 ГГц;
- проаналізувати результати створення теоретичних основ розробки SIW – компонентів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для радарів РСА.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Результати дослідження процесу формування теоретичних основ розробки SIW – хвилеводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ для радарів РСА

Модель діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ в області НВЧ

Для опису частотної залежності комплексної діелектричної проникності кристалів ZnSe у НВЧ-діапазоні (1–100 ГГц) використано узагальнену модель лінійного діелектричного відгуку, яка враховує внески електронної поляризації, релаксаційних процесів за участі дефектів структури та електропровідності. Рівняння комплексної діелектричної проникності має вигляд [14]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \sum_j \left(\frac{\Delta\varepsilon_j}{1 + (i\omega\tau_j)^{1-\alpha_j}} \right) - i \left(\frac{\sigma(\omega)}{\varepsilon_0 \omega} \right), \quad (1)$$

де ε_∞ – внесок швидких процесів поляризації (переважно електронної) у величину комплексної діелектричної проникності; $\Delta\varepsilon_j$ – внесок j -го релаксаційного процесу; τ_j – характерний час релаксації; α_j – параметр, що визначає розподіл часу релаксації; ω – циклічна частота електричного поля; $\sigma(\omega)$ – залежність питомої електропровідності матеріалу від циклічної частоти електричного поля; ε_0 – електрична константа. Оскільки власні фонові резонанси кристалів $A^{II}B^{VI}$ відповідають значенням частоти у декілька терагерц, у частотному інтервалі 1–100 ГГц їхній вплив зводиться до квазістатичного внеску, який враховано у параметрі ε_∞ . Таким чином, частотна дисперсія комплексної діелектричної проникності кристалів $A^{II}B^{VI}$ у досліджуваному діапазоні визначається переважно релаксаційними процесами та внеском електропровідності.

Для кристалів $A^{II}B^{VI}$ нерідко є характерним універсальний діелектричний відгук, при якому питома електропровідність кристала за Джоншером описується виразом:

$$\sigma(\omega) = \sigma_{DC} + A\omega^s, \quad (2)$$

де σ_{DC} – питома електропровідність на постійному струмі; A – коефіцієнт питомої електропровідності на змінному струмі; s – параметр Джоншера, що визначається механізмом переносу носіїв заряду і

знаходиться в інтервалі (0;1). Добре відомо, що для досконалих у структурному відношенні кристалів $A^{II}B^{VI}$ параметр s знаходиться в інтервалі 0,6 – 0,9.

Згідно [14] на досліджуваних частотах релаксаційна поляризація кристалів $A^{II}B^{VI}$ є незначною порівняно з електронною поляризацією та процесами електропровідності. Тоді згідно (1), дійсна частина комплексної діелектричної проникності кристалів $A^{II}B^{VI}$ у міліметровому діапазоні буде близька до ε_{∞} . Оцінимо величину A з виразу (2) для кристалів ZnSe. Згідно експериментальних даних [15], для цих кристалів величина коефіцієнта діелектричних втрат в області частоти 100 ГГц складає $\varepsilon''=2-4$. Отже, приймаючи $s = 0,6-0,9$, а $\sigma_{DC} = 10^{-7} - 10^{-10}$ См/м за виразом

$$A = \frac{\varepsilon'' \varepsilon_0 \omega - \sigma_{DC}}{\omega^s}, \quad (3)$$

отримаємо значення $A \approx 10^{-10} - 10^{-6}$ [с^с / (Ом·м)]. На рис. 1 наведено залежність коефіцієнта питомої електропровідності на змінному струмі A кристалів ZnSe від величини коефіцієнта діелектричних втрат на частоті 100 ГГц при різних значеннях ступеня s . Зазначимо, що величина коефіцієнта A дуже слабо залежить від низькочастотної питомої електропровідності кристала ZnSe. До того ж, зі зростанням величини s коефіцієнт A суттєво зменшується, а зі зростанням коефіцієнта діелектричних втрат коефіцієнт A дещо збільшується. На рис. 2 представлено частотну залежність питомої електропровідності кристалів ZnSe, побудовану згідно виразу (2). Видно, що зі зростанням частоти та величини ступеня s електропровідність матеріалу ZnSe теж підвищується.

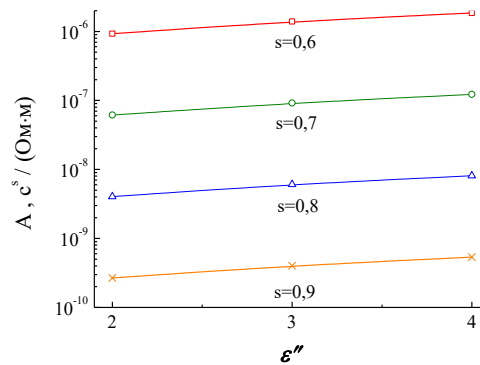


Рис. 1. Залежність коефіцієнта питомої електропровідності на змінному струмі від коефіцієнта діелектричних втрат кристалів ZnSe при $\sigma_{DC} = 10^{-7}$ См/м

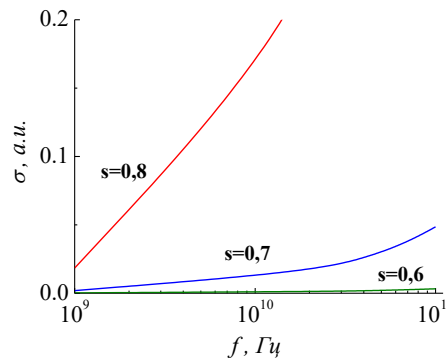


Рис. 2. Частотна залежність питомої електропровідності кристалів ZnSe при $\sigma_{DC} = 10^{-7}$ См/м

Треба зазначити, що в науковій літературі майже відсутні дані щодо комплексної діелектричної проникності кристалів $A^{II}B^{VI}$ у НВЧ діапазоні 1 – 100 ГГц. Отже, в подальших розрахунках коефіцієнта діелектричних втрат кристалів $A^{II}B^{VI}$ різного складу будемо припускати, що їх коефіцієнт питомої електропровідності на змінному струмі A в діапазоні 1 – 100 ГГц близький до величини A кристалів ZnSe. Крім того, будемо вважати, що значення реальної частини комплексної діелектричної проникності кристалів $A^{II}B^{VI}$ в діапазоні 1 – 100 ГГц близьке до величини ε_{∞} , яка, як правило, визначається за результатами вимірів в оптичному діапазоні. І, нарешті, будемо враховувати те, що, згідно з [14] комплексна діелектрична проникність кристалів $A^{II}B^{VI}$ в діапазоні 1 – 100 ГГц мало змінюється з частотою електричного поля.

Оцінка величини діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ в області НВЧ

Згідно описаної в п. 2.1 моделі діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ в області НВЧ оцінимо величину їх діелектричних сталей в діапазоні 1 – 100 ГГц. Оцінку виконано з використанням даних таблиці 1. Оцінку виконано згідно даних таблиці 1.

Таблиця 1

Електрофізичні параметри кристалів A^{II}B^{VI}

Матеріал	ϵ_0	ρ , Ом·м
ZnS	5,13 [12]	$10^8 - 10^{10}$ [16]
ZnSe	6,2 [12]	10^{10} [17]
ZnTe	7,28 [12]	290 [18]
CdTe	7,21 [12]	$1,5 \cdot 10^{-2}$ [18]
CdZnTe	7,1 [20]	$10^7 - 10^8$ [19]

В цій таблиці вказано величину височастотної діелектричної проникності та питомого електроопору кристалів A^{II}B^{VI} різного складу. Оцінка величини коефіцієнта діелектричних втрат досліджуваних кристалів в області НВЧ виконувалась з застосуванням даних питомого електроопору з табл. 1 та відповідних зв'язаних пар параметрів – коефіцієнта А та значення ступеня s. Зазначимо, що згідно моделі електропровідності Джоншера значення ступеня s для досконалих матеріалів наближається до 1. Отримані оціночні значення коефіцієнта діелектричних втрат в досліджуваному діапазоні частот наведено в табл. 2. Як і очікувалось, зі зниженням частоти електричного поля коефіцієнт діелектричних втрат зростає. До того ж спостерігається зростання уявної частини комплексної діелектричної проникності кристалів зі зменшенням величини ступеня s.

Таблиця 2

Коефіцієнт діелектричних втрат кристалів A^{II}B^{VI}

f, ГГц	ϵ''			
	s=0,6	s=0,7	s=0,6	s=0,9
1	14	13	12	1,2
50	6	3,2	3	0,8
100	4,3	3	2,5	0,75

Розрахунок SIW – хвильоводу на основі кристалів A^{II}B^{VI}

Розрахунок проводиться для домінантної моди TE_{1,0} для декількох частот з діапазону 1 – 100 ГГц з використанням кристалів A^{II}B^{VI} як діелектричної основи згідно методики, описаної у [10]. Частота відсічки домінантної моди визначається як:

$$fc_{1,0} = \frac{c}{2w_{\text{eff}}\sqrt{\epsilon}}, \quad (4)$$

де c – швидкість світла у вакуумі; w_{eff} – ефективна ширина SIW – хвильоводу; ε – діелектрична проникність матеріалу основи. Знаючи діапазон робочих частот хвильоводу (f_{pmin}; f_{pmax}), визначають значення частоти відсічки домінантної моди з умови fc_{1,0} < 0,8 f_{pmin} та частоти відсічки вищої моди з виразу fc_{2,0} = 2 fc_{1,0} за умови, що fc_{2,0} > f_{pmax}. З виразу (4), знаючи частоту fc_{1,0}, визначають w_{eff}. Далі вибирають величину відношення відстані між отворами p до діаметру отвору з умови, що (p/d) < 2,0. Наступним кроком вибирають величину відношення d до ширини хвильоводу w так, щоб (d/w) < (1/5). Ширину SIW-хвильоводу визначають з рівняння:

$$w_{\text{eff}} = w - 1,08 \frac{d^2}{p} + 0,1 \frac{d^2}{w}. \quad (5)$$

При цьому для мінімізації втрат енергії через випромінювання бажано виконання умови d < (1/5) λ, де λ – довжина хвилі в SIW – хвильоводі. За відомим значенням w розраховують параметри d та p. При потребі розрахунку SIW-резонатора, а не простого хвильовода, виконується визначення його ефективної довжини за співвідношенням:

$$\ell = \frac{c w_{\text{eff}}^2}{\sqrt{4 \mu \epsilon f_p^2 w_{\text{eff}}^2 - c^2}}, \quad (6)$$

де c – швидкість світла у вакуумі; w_{eff} – ефективна ширина SIW – резонатора; ε – діелектрична проникність матеріалу основи; μ – магнітна проникність матеріалу основи; f_p – основна резонансна частота. І, нарешті, визначають довжину резонатора згідно рівняння:

$$\ell = \ell + 0.1 \frac{d^2}{\ell} \quad (7)$$

Розрахунки проводились для частот електромагнітного поля, що наведені в таблиці 3. Робоча смуга частот відповідала інтервалу $\pm 20\%$ відносно робочої частоти.

Таблиця 3

Частоти електромагнітного поля, які використовували для розрахунків

f_p , Hz	f_{pmin} , Hz	f_{pmax} , Hz	f_{CL0} , Hz	f_{CL0} , Hz
10^9	$8 \cdot 10^8$	$1.2 \cdot 10^9$	$7.2 \cdot 10^8$	$1.44 \cdot 10^9$
10^{10}	$8 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^{10}$	$7.2 \cdot 10^9$	$1.44 \cdot 10^{10}$
$5 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$3.6 \cdot 10^{10}$	$7.2 \cdot 10^{10}$
10^{11}	$8 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^{11}$	$7.2 \cdot 10^{10}$	$1.44 \cdot 10^{11}$

Результати розрахунків параметрів SIW-хвильоводів на основі кристалів ZnS, ZnSe і CdZnTe надано в таблицях 4, 5 та 6.

Таблиця 4

Параметри SIW-хвильовода на основі ZnS

f_p , Hz	w_{eff} , м	d , м	w , м	p , м
10^9	$9.20 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-2}$	$10.3 \cdot 10^{-2}$	$3.70 \cdot 10^{-2}$
10^{10}	$9.20 \cdot 10^{-3}$	$1.95 \cdot 10^{-3}$	$1.03 \cdot 10^{-2}$	$3.71 \cdot 10^{-3}$
$5 \cdot 10^{10}$	$1.84 \cdot 10^{-3}$	$3.90 \cdot 10^{-4}$	$2.05 \cdot 10^{-3}$	$7.42 \cdot 10^{-4}$
10^{11}	$9.20 \cdot 10^{-4}$	$1.95 \cdot 10^{-4}$	$1.03 \cdot 10^{-3}$	$3.71 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 5

Параметри SIW-хвильовода на основі ZnSe

f_p , Hz	w_{eff} , м	d , м	w , м	p , м
10^9	$8.40 \cdot 10^{-2}$	$1.80 \cdot 10^{-2}$	$9.30 \cdot 10^{-2}$	$3.40 \cdot 10^{-2}$
10^{10}	$8.37 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-3}$	$9.34 \cdot 10^{-3}$	$3.37 \cdot 10^{-3}$
$5 \cdot 10^{10}$	$1.67 \cdot 10^{-3}$	$3.55 \cdot 10^{-4}$	$1.87 \cdot 10^{-3}$	$6.75 \cdot 10^{-4}$
10^{11}	$8.37 \cdot 10^{-4}$	$1.78 \cdot 10^{-4}$	$9.34 \cdot 10^{-4}$	$3.37 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 6

Параметри SIW-хвильовода на основі CdZnTe

f_p , Hz	w_{eff} , м	d , м	w , м	p , м
10^9	$7.80 \cdot 10^{-2}$	$1.70 \cdot 10^{-2}$	$8.70 \cdot 10^{-2}$	$3.20 \cdot 10^{-2}$
10^{10}	$7.82 \cdot 10^{-3}$	$1.66 \cdot 10^{-3}$	$8.73 \cdot 10^{-3}$	$3.15 \cdot 10^{-3}$
$5 \cdot 10^{10}$	$1.56 \cdot 10^{-3}$	$3.32 \cdot 10^{-4}$	$1.75 \cdot 10^{-3}$	$6.30 \cdot 10^{-4}$
10^{11}	$7.82 \cdot 10^{-4}$	$1.66 \cdot 10^{-4}$	$8.73 \cdot 10^{-4}$	$3.15 \cdot 10^{-4}$

Приклад реалізації

Для приладу виконано моделювання характеристик SIW-хвильоводу на основі кристала ZnS на частоті 1 ГГц за допомогою симулятора Ansys HFSS. Для формування моделі хвильоводу в даному програмному забезпеченні було використано дані з таблиць 1 – 4. Товщина h діелектрика хвильоводу була визначена з умови $h/d \geq 1$.

На рис. 3 та 4 наведено результати моделювання S-параметрів зазначеного хвильоводу. З цих рисунків

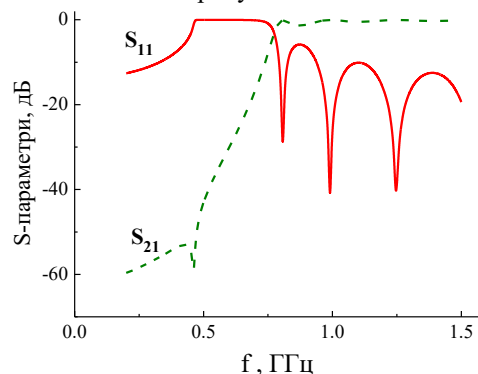


Рис. 3. Частотна залежність S-параметрів SIW-хвильоводу на основі кристалів ZnS, що розраховано для частоти 1 ГГц. $\text{tg} \delta = 0,001$

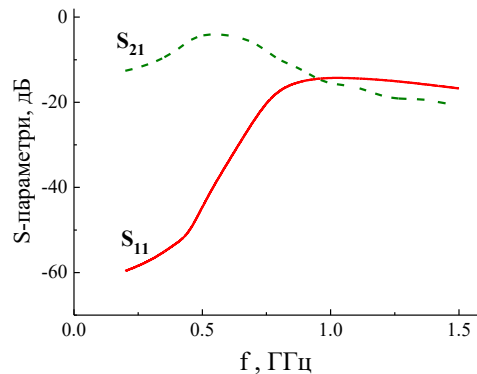


Рис. 4. Частотна залежність S-параметрів
SIW-хвильоводу на основі кристалів ZnS, що розраховано для частоти 1 ГГц. $\text{tg}\delta = 0,234$

видно, що зі зростанням величини тангенса кута діелектричних втрат ZnS частотні характеристики S-параметрів SIW-хвильоводу погіршуються. Так, величина S_{11} складає близько -14 дБ, а величина S_{21} – близько -15 дБ в області основної частоти 1 ГГц (див. рис. 4). У той же час, для SIW-хвильоводу на основі ZnS з малими втратами величина S_{11} близька до -40 дБ, а величина S_{21} – до 0 дБ на частоті 1 ГГц (див. рис. 3).

На рис. 5 наведено розподіл модуля вектору напруженості електричного поля у SIW-хвильоводі. Даний розподіл свідчить про те, що електричне поле переважно зосереджене всередині хвильоводу, а рядки металізованих отворів відіграють роль його бічних стінок, не пропускаючи електричне поле назовні.

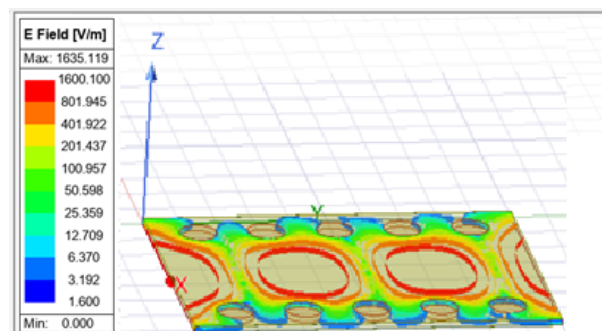


Рис. 5. Розподіл електричного поля в SIW-хвильоводі на основі ZnS, що розраховано для частоти 1 ГГц

Обговорення

Наведені в табл. 2 параметри свідчать про те, що найбільш перспективними для створення SIW-хвильоводів діелектричними матеріалами серед розглянутих кристалів $A^{II}B^{VI}$ є ZnS, ZnSe та CdZnTe. Саме ці кристали характеризуються високим питомим електроопором та досить великими значеннями реальної частини комплексної діелектричної проникності. Причому, найбільшу величину діелектричної проникності в мікрохвильовому діапазоні мають саме кристали CdZnTe. Отже найбільшої мініатюризації SIW-хвильоводів можливо досягнути з використанням саме цих кристалів.

Діелектричні властивості кристалів $A^{II}B^{VI}$ в НВЧ діапазоні 1 – 100 ГГц було оцінено в припущенні, що найбільший внесок у діелектричні втрати чинить електропровідність згідно моделі Доншера, а релаксаційні механізми є незначними на зазначених частотах і ними можна знехтувати. Виконане оцінювання на основі даного припущення свідчить щодо досить великих значень коефіцієнта діелектричних втрат кристалів $A^{II}B^{VI}$ в НВЧ діапазоні (див. табл. 2). До того ж застосована модель діелектричного відгуку не враховує особливостей кристалів $A^{II}B^{VI}$ різного складу, які відрізняються дефектною системою. Ймовірно, що в мікрохвильовому діапазоні певні складові дефектної системи таких кристалів можуть чинити відчутний внесок у релаксаційні процеси. І, нарешті, експериментальні дані щодо діелектричних параметрів кристалів $A^{II}B^{VI}$ в мікрохвильовому діапазоні майже відсутні у науковій літературі. Отже, існує нагальна необхідність експериментального визначення діелектричних властивостей кристалів $A^{II}B^{VI}$ в діапазоні 1 – 100 ГГц для створення SIW-хвильоводів на їх основі.

Результати розрахунків розмірів SIW – хвильоводів на основі кристалів $A^{II}B^{VI}$ свідчать про те, що найбільш доцільно з токи зору мініатюризації створювати SIW-компоненти на основі кристалів $A^{II}B^{VI}$ для частот вище 10 ГГц. До того ж, використання кристалів CdZnTe дає можливість зменшити розміри SIW-хвильоводу до 15% порівняно з кристалами $A^{II}B^{VI}$ іншого складу.

Моделювання S-параметрів SIW-хвильоводів показало, що для мінімізації втрат та покращення узгодження необхідні кристали $A^{IV}B^{VI}$ з низькою величиною тангенса кута діелектричних втрат на рівні 0,001 – 0,01. Створена модель SIW-хвильоводу при $tg\delta = 0,234$ мала допустимий рівень S_{11} , але вкрай низький коефіцієнт передачі на робочій частоті. Отже, дані табл. 2 потребують експериментального уточнення.

Окремим питанням є технологія формування SIW – хвильоводів на основі кристалів $A^{IV}B^{VI}$. На цей момент такої технології не існує. Проте, відомо що виробники постачають прямокутні підкладки CdZnTe товщиною $\approx 0.5 - 1.3$ мм та сторонами від 5×5 мм. Також можливе застосування мікросвердління, ультразвукового або лазерного свердління кристалів $A^{IV}B^{VI}$ для формування отворів діаметром від ≈ 100 мкм. Для металізації поверхонь кристалів можливе застосування тонкоплівкового напилення або електрохімічного осадження. Отже, вважаємо, що можливо розробити технологію виготовлення SIW-хвильоводів на основі кристалів $A^{IV}B^{VI}$.

Електрофізичні властивості цих кристалів досліджувались вченими ХАІ впродовж останніх 60 років. Зокрема зусиллями Рвачова О.Л., Мигалія В.П., Чугая О.М., Абашина С.Л. та Олійника С.В. встановлені закономірності впливу дефектів структури та інших неоднорідностей на діелектричні властивості модельних кристалів в широкому інтервалі частот. Цей доробок свідчить про можливість синтезу SIW-структур на базі зазначених матеріалів з керованими діелектричними параметрами. В якості керуючих факторів можливе застосування фотозбудження, нагріву/охолодження, легування, іонізуючого випромінювання. Окремий перспективний напрямок керування діелектричними параметрами – формування композитних матеріалів на основі частинок кристалів $A^{IV}B^{VI}$.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В роботі вперше створено теоретичні основи розробки SIW – хвильоводів на кристалах $A^{IV}B^{VI}$ для радарів РСА. Виконано оцінку величин реальної та мнімої частин комплексної діелектричної проникності кристалів ZnS, ZnSe, ZnTe, CdTe, CdZnTe в діапазоні мікрохвиль із застосуванням моделі універсального діелектричного відгуку Джоншера. Вперше розраховано SIW-хвильоводи на основі кристалів $A^{IV}B^{VI}$ для частот 1, 50 та 100 ГГц. В симуляторі Ansys HFSS створено модель SIW – хвильоводів на ZnS для частоти 1 ГГц і отримано частотні залежності S-параметрів. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що розробка SIW-компонентів на основі кристалів $A^{IV}B^{VI}$ має великий потенціал практичної реалізації, але потребує подальших комплексних досліджень: теоретичних, експериментальних і технологічних.

Майбутні дослідження будуть присвячені експериментальному визначенню діелектричних параметрів кристалів $A^{IV}B^{VI}$ в мікрохвильовому діапазоні 1 – 100 ГГц.

Фінансування

Дослідження проводилося за рахунок коштів держбюджету в рамках НДР «Теорія радіотехнічних систем формування фантомних радіозображень радаром аерокосмічного базування» (номер державної реєстрації 0124U001015) та «Малогабаритний бортовий радар з синтезуванням апертури антени для БПЛА та вертольотів» (номер державної реєстрації 0123U102002).

Література

1. Peksa, J. A review on the state of the art in copter drones and flight control systems [Text] / J. Peksa, D. Mamchur // Sensors. – 2024. – V.24, no. 11. – Article No 3349. DOI: [10.3390/s24113349](https://doi.org/10.3390/s24113349).
2. Das, S. Synthetic aperture radar for a changing planet: A 25-year global synthesis in hazard assessment, urban development, and ecological applications [Text] / S. Das, B. Chatterjee, M. R. Choudhury, S. Dutta, B. P. Mondal, A. Awasthi // Ecological Informatics. – 2025. – Vol. 92. – Art. no. 103477, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103477>.
3. Kim, S. Design and performance of X-band SAR payload for 80 kg class flat-panel-type microsatellite based on active phased array antenna [Text] / S. Kim, C. M. Song, S. H. Lee, S. C. Song, H. U. Oh // Aerospace. – 2022. – Vol. 9, no. 4. – Art. no. 213, <https://doi.org/10.3390/aerospace9040213>.
4. Камалтинов, Г. Г. Тенденції та перспективи розвитку радіолокаційних засобів безпілотних літальних апаратів [Текст] / Г. Г. Камалтинов, О. М. Колеснік, В. О. Тютюнник, К. В. Шутько // Системи озброєння і військова техніка. – 2024. – № 4 (80). – С. 99–108, <https://doi.org/10.30748/soivt.2024.80.12>.
5. Ковальчук, Д. І. Розроблення бортового РСА з обробкою ЛЧМ сигналів у W-діапазоні хвиль з використанням елементної бази українського виробництва [Текст] / Д. І. Ковальчук, С. С. Жила, М. А. Вонсович, О. Ю. Косолапов, Я. Д. Сидоров // Системи обробки інформації. – 2025. – № 3 (182). – С. 44–59, <https://doi.org/10.30748/soi.2025.182.05>.
6. Pavlikov, V. Foundations of radar synthesis theory of phantom objects formation in SAR images [Text] / V. Pavlikov, S. Zhyla, P. Pozdniakov, D. Kolesnikov, H. Cherepnin, O. Shmatko, E. Tserne // Radioelectronic and Computer Systems. – 2024. – No. 4. – P. 123–140, <https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.11>.

7. Kumar, A. A review on gain enhancement techniques of microstrip antenna [Text] / A. Kumar, R. Khandelwal, S. Singh, A. Kumar, A. Makhdumi // 2021 2nd International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM). – 2021. – P. 476–479, <https://doi.org/10.1109/ICIEM51511.2021.9445306>.
8. Das, H. Microstrip antenna: an overview and its performance parameter [Text] / H. Das, M. Sharma, Q. Xu // Smart Antennas: Latest Trends in Design and Application. – 2022. – P. 3–14, https://doi.org/10.1007/978-3-030-76636-8_1.
9. Компланарний хвилевід: переваги та недоліки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.admicrowave.com/knowledge/coplanar-waveguide-advantages-and-disadvantages> (дата звернення: 10.12.2025). – Назва з екрана.
10. Nwajana, A. O. A review on SIW and its applications to microwave components [Text] / A. O. Nwajana, E. R. Obi // Electronics. – 2022. – Vol. 11, no. 7. – Art. no. 1160, <https://doi.org/10.3390/electronics11071160>.
11. Чикун, Р. С. Аналіз сучасних діелектричних матеріалів та перспективи їх використання в мікросмужкових сенсорах гігагерцового діапазону [Текст] / Р. С. Чикун // Радіoeлектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 29-го Міжнар. молодіж. форуму, 16–19 квіт. 2025 р. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Т. 1. – С. 84–86.
12. Verma, A. S. Dielectric constants of zinc-blende semiconductors [Text] / A. S. Verma, N. Pal, B. K. Sarkar, R. Bhandari, V. K. Jindal // Physica Scripta. – 2011. – Vol. 85, no. 1. – Art. no. 015705, <https://doi.org/10.1088/0031-8949/85/01/015705>.
13. Xu, F. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide [Text] / F. Xu, K. Wu // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2005. – Vol. 53, no. 1. – P. 66–73, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.839303>.
14. Поплавко, Ю. М. Фізика діелектриків [Текст]. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 572 с.
15. Tapia, A. K. G. Charge carrier dynamics of ZnSe by optical-pump terahertz-probe spectroscopy [Text] / A. K. G. Tapia, N. Yamamoto, C. Ponseca, K. Tominaga // 2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2011. – P. 1–2, <https://doi.org/10.1109/irmmw-THz.2011.6105008>.
16. Saleh, M. Luminescence of undoped commercial ZnS crystals: A critical review and new evidence on the role of impurities using photoluminescence and electrical transient spectroscopy [Text] / M. Saleh, K. G. Lynn, L. G. Jacobsohn, J. S. McCloy // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 125, no. 7, <https://doi.org/10.1063/1.5084738>.
17. Чугай, О. М. Діелектричні, оптичні та фотоелектричні властивості кристалів $A^{II}B^{VI}$, вирощених з розплаву [Текст] : монографія / О. М. Чугай, С. В. Олійник, В. П. Колесник, О. О. Полубояров, Д. В. Слюсар, С. В. Сулима, О. О. Волошин. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 191 с.
18. Errandonea, D. Hall-effect and resistivity measurements in CdTe and ZnTe at high pressure [Text] / D. Errandonea, A. Segura, D. Martínez-García, V. Muñoz-San Jose // Physical Review B. – 2009. – Vol. 79, no. 12. – Art. no. 125203, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.125203>.
19. Олійник, С. В. Фізичні основи формування електричних та фотоелектричних властивостей кристалів $A^{II}B^{VI}$ і електричних властивостей багатокомпонентних покриттів [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.07 / Олійник Сергій Володимирович. – Львів, 2024. – 321 с.
20. Doğru Balbaşı, Ç. Growth, characterization and device applications of cadmium zinc telluride thin films [Text] : Ph.D. thesis / Ç. Doğru Balbaşı. – Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2022.

References

1. Peksa, J., Mamchur, D. A review on the state of the art in copter drones and flight control systems. Sensors, 2024, V.24, no. 11, Article No 3349. DOI: [10.3390/s24113349](https://doi.org/10.3390/s24113349).
2. Das, S., Chatterjee, B., Roy Choudhury, M., Dutta, S., Mondal, B. P., Awasthi, A. Synthetic aperture radar for a changing planet: A 25-year global synthesis in hazard assessment, urban development, and ecological applications. Ecological Informatics, 2025, vol. 92, article no. 103477, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103477>.
3. Kim, S., Song, C. M., Lee, S. H., Song, S. C., Oh, H. U. Design and performance of X-band SAR payload for 80 kg class flat-panel-type microsatellite based on active phased array antenna. Aerospace, 2022, vol. 9, no. 4, article no. 213, <https://doi.org/10.3390/aerospace9040213>.
4. Kamaltinov, H. H., Kolesnik, O. M., Tiutiunnyk, V. O., Shutko, K. V. Tendentsiyi ta perspektivy rozvytku radiolokatsiynykh zasobiv bezpilotnykh lital'nykh apparativ [Trends and prospects for the development of radar systems of unmanned aerial vehicles]. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika, 2024, no. 4 (80), pp. 99–108, <https://doi.org/10.30748/soivt.2024.80.12>.
5. Kovalchuk, D. I., Zhyla, S. S., Vonsovykh, M. A., Kosolapov, O. Yu., Sidorov, Ya. D. Rozroblennya bortovoho RSA z obrobkoyu LChM syhnaliv u W-diapazoni khvyli' z vykorystannyam elementnoyi bazy ukrains'koho vyrobnytstva [Development of an airborne SAR with LFM signal processing in the W-band using Ukrainian-made components]. Systemy obrobky informatsiyi, 2025, no. 3 (182), pp. 44–59, <https://doi.org/10.30748/soi.2025.182.05>.
6. Pavlikov, V., Zhyla, S., Pozdniakov, P., Kolesnikov, D., Cherepnin, H., Shmatko, O., Tserne, E. Foundations of radar synthesis theory of phantom objects formation in SAR images. Radioelectronic and Computer Systems, 2024, no. 4, pp. 123–140, <https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.11>.

7. Kumar, A., Khandelwal, R., Singh, S., Kumar, A., Makhdumi, A. A review on gain enhancement techniques of microstrip antenna. Proc. 2nd Int. Conf. on Intelligent Engineering and Management (ICIEM), IEEE, 2021, pp. 476–479, <https://doi.org/10.1109/ICIEM51511.2021.9445306>.
8. Das, H., Sharma, M., Xu, Q. Microstrip antenna: an overview and its performance parameter. Smart Antennas: Latest Trends in Design and Application, 2022, pp. 3–14, https://doi.org/10.1007/978-3-030-76636-8_1.
9. Komplanarnyy khvylevid: perevahy ta nedoliky [Coplanar waveguide: advantages and disadvantages]. Available at: <https://uk.admicrowave.com/knowledge/coplanar-waveguide-advantages-and-disadvantages> (accessed 10 December 2025).
10. Nwajana, A. O., Obi, E. R. A review on SIW and its applications to microwave components. Electronics, 2022, vol. 11, no. 7, article no. 1160, <https://doi.org/10.3390/electronics11071160>.
11. Chykun, R. S. Analiz suchasnykh dielektrychnykh materialiv ta perspektyvy yikh vykorystannya v mikrosmuzhkovykh sensorakh hihahertsovoho diapazonu [Analysis of modern dielectric materials and prospects for their use in microstrip sensors of the gigahertz range]. Radioelektronika ta molod' u XXI stolitti, [Proc. 29th Int. Youth Forum], Kharkiv, 2025, vol. 1, pp. 84–86.
12. Verma, A. S., Pal, N., Sarkar, B. K., Bhandari, R., Jindal, V. K. Dielectric constants of zinc-blende semiconductors. Physica Scripta, 2011, vol. 85, no. 1, article no. 015705, <https://doi.org/10.1088/0031-8949/85/01/015705>.
13. Xu, F., Wu, K. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, vol. 53, no. 1, pp. 66–73, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.839303>.
14. Poplavko, Yu. M. Fizyka dielektrykiv [Physics of dielectrics]. K.: NTUU "KPI". 572 p.
15. Tapia, A. K. G., Yamamoto, N., Ponseca, C., Tominaga, K. Charge carrier dynamics of ZnSe by optical-pump terahertz-probe spectroscopy. Proc. Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IEEE, 2011, pp. 1–2, <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2011.6105008>.
16. Saleh, M., Lynn, K. G., Jacobsohn, L. G., McCloy, J. S. Luminescence of undoped commercial ZnS crystals: A critical review and new evidence on the role of impurities using photoluminescence and electrical transient spectroscopy. Journal of Applied Physics, 2019, vol. 125, no. 7, <https://doi.org/10.1063/1.5084738>.
17. Chuhay, O. M., Oliynyk, S. V., Kolesnyk, V. P., Poluboyarov, O. O., Slyusar, D. V., Sulyma, S. V., Voloshyn, O. O. Dielektrychni, optychni ta fotoelektrychni vlastyvoli krystaliv $A^{II}B^{VI}$, vyroshchennykh z rozplavu [Dielectric, optical and photoelectric properties of $A^{II}B^{VI}$ crystals grown from melt]. Kharkiv, National Aerospace University "KhAI" Publ., 2021. 191 p.
18. Errandonea, D., Segura, A., Martínez-García, D., Muñoz-San Jose, V. Hall-effect and resistivity measurements in CdTe and ZnTe at high pressure. Physical Review B, 2009, vol. 79, no. 12, article no. 125203, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.125203>.
19. Oliynyk, S. V. Fizychni osnovy formuvannya elektrychnykh ta fotoelektrychnykh vlastyvostei krystaliv $A^{II}B^{VI}$ i elektrychnykh vlastyvostei bahatokomponentnykh pokryttiv Diss. dokt. tekhn. nauk [Physical foundations of formation of electrical and photoelectric properties of $A^{II}B^{VI}$ crystals and electrical properties of multicomponent coatings. Dr. eng. sci. diss.], Lviv, 2024. 321 p.
20. Doğru Balbaşı, Ç. Growth, characterization and device applications of cadmium zinc telluride thin films. PhD diss., 2022.