

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

ДОРМІДОНТОВ АНАТОЛІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 537.86; 621.372

**ВЗАЄМОДІЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК
І ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ В ЦИЛІНДРИЧНИХ
ТВЕРДОТІЛЬНИХ СТРУКТУРАХ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Прокопенко Юрій Володимирович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України
провідний науковий співробітник відділу "Радіофізики
твердого тіла"

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Шульга Сергій Миколайович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Міністерства освіти і науки України,
декан факультету радіофізики, біомедичної електроніки та
комп'ютерних систем

доктор фізико-математичних наук, професор
Грицунов Олександр Валентинович,
Харківський національний університет радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та
пристроїв

Захист відбудеться « 16 » травня 2019 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАНУ за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАНУ за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури, 12.

Автореферат розісланий « 12 » квітня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з актуальних проблем сучасної радіофізики та електроніки є дослідження механізмів генерації електромагнітних хвиль під час руху заряджених частинок в різних електродинамічних системах. Для створення джерел електромагнітного випромінювання міліметрового і субміліметрового діапазонів великий інтерес представляють пучкові нестійкості, що виникають в електродинамічних системах різноманітного роду. Особлива увага приділяється багатохвильовим черенковським генераторам поверхневих хвиль і системам на основі діелектричних структур [1, 11, 15]. При цьому до числа принципово важливих характеристик можливого процесу генерування відносяться втрати енергії однієї частинки в одиницю часу на збудження в системах власних хвиль та/або коливань [4–10, 16–20].

Також актуальною проблемою є дослідження фундаментальних властивостей твердотільних структур, які містять нанорозмірні фрагменти. Прогрес в технології виготовлення малорозмірних структур стимулює дослідження їх електромагнітних властивостей і механізмів збудження їх власних коливань (хвиль). В структурах, які містять шар двовимірного електронного газу (2D-газ), існують власні плазмові хвилі, що характеризуються малими фазовими швидкостями [5–7, 17–20]. Такий шар може бути створено шляхом нанесення тонкої провідної плівки на поверхню напівпровідника. Він також може бути утворений, наприклад, періодичною нерівною поверхнею напівпровідникового циліндра вздовж його твірної або в результаті електризації поверхні діелектричного циліндра під впливом статичного електричного поля потоку заряджених частинок. Його наявність створює умови для існування електростатичних хвиль в системі [5–7, 17–20]. Основна первинна інформація про властивості електродинамічних систем міститься в розв'язках їх дисперсійних рівнянь. Знання дисперсійних залежностей, в свою чергу, дозволяють визначити умови нестійкостей систем, що виникають при взаємодії рухомих потоків заряджених частинок і полів власних коливань (хвиль) електродинамічних структур (середовищ).

Серед розробників електронно-вакуумної техніки намітилася тенденція освоєння міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль. Використання традиційних підходів до проектування і побудови електронних пристроїв зазнає великих труднощів, що обумовлені малими геометричними розмірами основних елементів, які генерують та стабілізують електромагнітні коливання. Вирішення даної проблеми приводить до використання надрозмірних (по відношенню до довжини хвилі) електродинамічних структур, що працюють в багатомодовому режимі. Генерування електромагнітних коливань зі стабільною частотою тісно пов'язано зі збудженням і селекцією робочої моди високого порядку в таких структурах.

Можливість збудження слабозгасаючих коливань в діелектричних резонаторах з циліндричними поверхнями на модах високого порядку – модах «шепочучої галереї» [1, 11, 15] – обумовлює їх застосування в пристроях вакуумної електроніки короткохвильового діапазону міліметрових і субміліметрових довжин хвиль. При цьому долаються зазначені вище труднощі конструктивного характеру. Однак рівень потужності випромінювання джерел традиційної побудови з переходом до субміліметрових довжин хвиль різко знижується. Отже, виникає необхідність використання високоенергетичних осциляторів, що збуджуються в електронних потоках.

Таким чином, дослідження як механізмів генерації електромагнітних хвиль при взаємодії заряджених частинок з твердотільними структурами, так і власних параметрів цих структур, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В дисертації містяться матеріали досліджень, які проводилися в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України в рамках Цільової програми наукових досліджень Відділення фізики і астрономії НАН України:

- «Фундаментальні властивості фізичних систем мікро- і макросвіту» виконувалася НДР "Дослідження лінійних та нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених часток", шифр "Кентавр-4", № держреєстрації 0106U011978, термін виконання 2007–2011 рр.;
- «Фундаментальні властивості матерії у широкому інтервалі масштабів простору і часу» виконувалася НДР "Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами", шифр "Кентавр-5", № держреєстрації 0112U000211, термін виконання 2012–2016 рр.;
- «Вивчення фундаментальних фізичних і астрономічних процесів та перспективи їхнього практичного застосування» виконується НДР "Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами", шифр "Кентавр-6", № держреєстрації 0117U004038, термін виконання 2017–2021 рр..

Мета і задачі дослідження

Мета дисертаційної роботи полягає у встановленні фізичних явищ і закономірностей, які проявляються при реакціях полів заряджених частинок, що рухаються поблизу поверхонь циліндричних твердотільних структур.

Виходячи з мети роботи, було розглянуто наступні задачі:

- дослідження електромагнітних полів, що утворюються в процесі руху заряджених частинок поблизу циліндричних поверхонь твердотільних структур;
- виявлення механізмів збудження власних хвиль в електродинамічних системах, що містять циліндричні твердотільні структури;
- виявлення ефектів зняття частотного виродження власних хвиль в циліндричних плазмоподібних структурах, що містяться у зовнішньому магнітному полі;
- вивчення впливу поверхневого плазмового шару на власні частоти напівпровідникового і діелектричного циліндрів;
- обґрунтування можливості збудження мод «шепочучої галереї» в циліндричних твердотільних структурах потоком заряджених частинок азимутально-періодичної конфігурації;
- розробка принципів створення джерел випромінювання міліметрового діапазону довжин хвиль, що містять високочастотні циліндричні діелектричні резонатори;
- створення спеціальних програмних засобів для дослідження розподілу компонент поля власних та вимушених хвиль (коливань) за просторовими координатами, визначення власних частот твердотільних циліндрів і резонансних частот електродинамічних структур, що збуджуються рухомою зарядженою частинкою.

Об'єктом дослідження є процеси взаємодії рухомих заряджених частинок і електромагнітних полів в електродинамічних системах з циліндричними твердотільними структурами.

Предметом дослідження є власні і вимушені коливання та хвилі в циліндричних твердотільних структурах; втрати енергії заряджених частинок, що рухаються в повздовжніх магнітних полях в різних електродинамічних структурах; мода селекція коливань «шепочучої галереї» багатострумним електронним пучком в автоколивальній системі на основі квазіоптичного циліндричного діелектричного резонатора.

Методи дослідження базуються на загальній теорії електромагнітного поля і апараті математичної фізики для розв'язання крайових задач, зокрема, теоріях диференціальних рівнянь, функцій комплексних змінних і спеціальних функцій, а також електродинаміки плазми. Разом з тим використовуються відомі чисельні методи розв'язку трансцендентних рівнянь. В експериментальних дослідженнях використовувались відомі та перевірені методи реєстрації вкрай високочастотного (ВВЧ) випромінювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в подальшому розвитку теорії поля власних і вимушених коливань та хвиль квазіоптичних циліндричних твердотільних структур, в тому числі тих, що містять плазмopodobні середовища, а також у вирішенні задачі побудови джерел електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону з використанням високодобротних циліндричних діелектричних резонаторів (ЦДР).

В роботі одержано наступні нові наукові результати.

- Вперше знайдено втрати енергії зарядженої частинки, що рухається прямолінійно або по спіральній траєкторії над поверхнею циліндра, який являє собою діелектрик, напівпровідник, діелектрик чи напівпровідник з нанорозмірним плазмовим шаром, або метал. Проаналізовано механізми збудження власних електромагнітних хвиль в таких системах в умовах черенковського і магнітогальмівного резонансів.
- Показано, що під час руху зарядженої частинки по спіральній траєкторії над поверхнею діелектричного чи напівпровідникового циліндра з 2D-електронним газом на його бічній поверхні в системі можливо збудження власних хвиль електростатичного походження.
- Вперше знайдено ефект невзаємності збудження власних хвиль 3D+2D плазмового циліндра з ідентичною структурою розподілу полів, але таких, що відрізняються напрямом поширення за азимутальною координатою, що приводить до зняття частотного виродження за азимутальним індексом.
- Вперше показано та експериментально обґрунтовано можливість збудження хвиль «шепочучої галереї» в ЦДР за допомогою азимутально-періодичного електронного пучка.
- Показано можливість селекції робочої моди резонатора при його збудженні азимутально-періодичним потоком електронів.

Практичне значення одержаних результатів. Виконані в дисертаційній роботі теоретичні дослідження розширюють та систематизують наукові уявлення про взаємодію електромагнітних випромінювань, що створюються рухомими зарядженими частинками, з різними електродинамічними циліндричними структурами, в тому числі і тих, що містять плазмopodobні середовища. Отримані теоретичні результати дозволять стимулювати і розвивати сучасні теоретичні і експериментальні дослідження в галузі взаємодії заряджених частинок чи потоків заряджених части-

нок з електромагнітними хвилями в діелектричних і плазмових хвилеведучих структурах. Практичні результати роботи можуть бути використані для створення джерел надвисокочастотного (НВЧ) і ВВЧ-випромінювань, генераторів та підсилювачів. Особливості взаємодії заряджених частинок з електродинамічними структурами, що було виявлено в дисертаційній роботі, дозволять покращити характеристики існуючих пристроїв. Вивчені механізми збудження власних хвиль твердотільних циліндричних структур можуть бути використані в розробках пристроїв сучасної НВЧ- і ВВЧ-радіофізики та плазмової електроніки.

Особистий внесок здобувача полягає в перевірці аналітичних розрахунків, участі в отриманні експериментальних даних, активній участі в аналізі та інтерпретації отриманих результатів, підготовці та написанні статей і тез доповідей. Чисельні дослідження дисперсійних рівнянь і розподілів полів власних коливань електродинамічних структур автором проведено самостійно. Зокрема, в роботах [1–7, 11–20] автор провів розрахунок власних частот циліндричних твердотільних структур. Втрати енергії рухомої частинки на збудження власних хвиль різних електродинамічних структур знайдено дисертантом в роботах [4–7, 16–20]. Автор взяв активну участь в експериментальних дослідженнях автоколивальної системи на основі ЦДР [1, 11, 15]. Розрахунок розподілів полів власних коливань резонатора належить автору в роботах [1–3, 8–15].

Формулювання теми і мети, аналіз та обговорення отриманих результатів дослідження і формулювання висновків проведено спільно з науковим керівником доктором фіз.-мат. наук, с. н. с. Ю. В. Прокопенком.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на семінарах Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України.

Наукові результати і основні положення дисертаційної роботи були представлені і опубліковані в матеріалах 13 наукових конференцій і симпозіумів: Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014); International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv, 2010, 2013, 2016); 12-th International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (Lviv-Slavske, 2014); 20-th International Conference on Microwave, Radar, and Wireless Communications (Gdansk, Poland, 2014); 15-th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Dnipropetrovsk, 2014); 14-th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Kharkiv, 2014).

Публікації. Основні результати наукових досліджень, виконаних в рамках дисертаційної роботи, опубліковано в 7 статтях в зарубіжних і вітчизняних фахових виданнях, а також в матеріалах і тезах доповідей на 13 міжнародних науково-технічних конференціях та симпозіумах.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, переліку умовних позначень і скорочень, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатка. Повний об'єм дисертації складає 134 сторінки, з них 95 сторінок основного тексту. Дисертація містить 26 рисунків і 1 таблицю. Перелік використаних джерел на 12 сторінках містить 113 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано ідею, визначено мету роботи і сформульовано задачі досліджень, що необхідно вирішити для досягнення поставленої мети. Відображено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Наведено основні наукові положення, що відображають новизну і практичне значення одержаних результатів. Висвітлено особистий внесок здобувача, а також наведено дані про апробацію результатів роботи.

Перший розділ присвячено аналітичному огляду літератури, що пов'язана з розглянутими в дисертації задачами, а також аналізу досягнутого рівня досліджень за темою дисертації. Показано основні етапи розвитку досліджень, що присвячені взаємодії рухомих заряджених частинок з електромагнітними полями в різних електродинамічних системах. В процесі аналізу результатів, що досягнуті в цій галузі досліджень, виділено задачі, рішення яких представлено в дисертації. Обгрунтовано необхідність подальших досліджень.

У другому розділі знайдено втрати енергії зарядженої частинки, що рухається в зовнішньому магнітному полі в ізотропному середовищі по спіральній траєкторії над бічною поверхнею твердотілого циліндра, на випромінювання (рис. 1). Частинка з зарядом e та масою m_0 (електрон) рухається з поступальною швидкістю v_z по гвинтовій лінії з радіусом ρ_0 у магнітному полі з напруженістю H_0 над твердотілим циліндром з радіусом ρ_1 , вісь якого направлена вздовж осі Z .

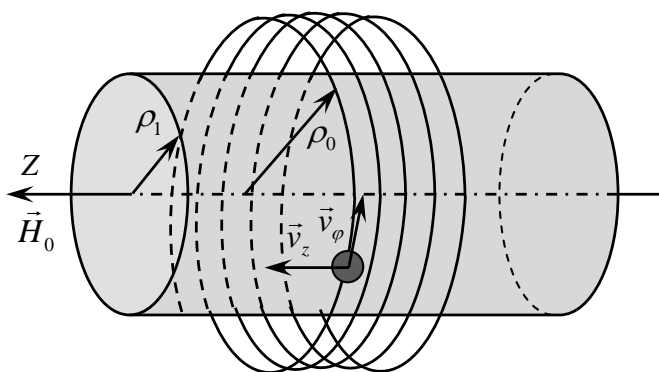


Рисунок 1 – Рух зарядженої частинки в магнітному полі над циліндром

Розглянуто декілька різних електродинамічних систем: рух частинки у вакуумі (діелектрична проникність $\varepsilon = 1$), рух над поверхнею ізотропного діелектричного циліндра (з проникністю ε_1) і над поверхнею ідеально-провідного циліндра. Крім того, розглянуто два випадки руху розподіленого заряду у вигляді кільця вздовж поперечної координати над діелектричним циліндром і в середовищі з $\varepsilon > 1$.

Втрати енергії частинки в одиницю часу dW/dt мають вигляд:

$$dW/dt = e \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} dq_z d\omega \left\{ (v_z - nq_z v_\phi / (\rho_0 q^2)) E_{zn}^e - i\omega v_\phi / (cq) H_{zn}^{e'} + \right. \\ \left. + (\Delta_{1n} / \Delta_n) (v_z - (nq_z v_\phi / \rho_0 q^2)) H_n(q\rho_0) - i(\Delta_{2n} / \Delta_n) (\omega v_\phi / cq) H_n'(q\rho_0) \right\}. \quad (1)$$

Тут $q^2 = \varepsilon\omega^2/c^2 - q_z^2$ – квадрат поперечного хвильового числа; ω – частота парціальної хвилі; c – швидкість світла; $q_z = (\omega - n|\omega_H|)/v_z$ – повздовжнє (аксіальне) хвильове число; $\omega_H = (eH_0/m_0c)\sqrt{1 - v^2/c^2}$ – циклотронна частота частинки, що рухається зі швидкістю $v = \sqrt{v_z^2 + v_\phi^2}$; v_ϕ – швидкість обертального руху частинки в площині поперечного перерізу циліндра; n – азимутальний модовий індекс, який

визначається номером просторової гармоніки циклотронної частоти і відповідає порядку циліндричних функцій, а також половині кількості варіацій поля вздовж азимутальної координати φ . E_{zn}^e і H_{zn}^e – електрична і магнітна аксіальні компоненти поля частинки відповідно. $H_n(q\rho)$ – функції Ханкеля n -го порядку першого роду $H_n^{(1)}(q\rho)$ при $\omega > 0$ або другого роду $H_n^{(2)}(q\rho)$ при $\omega < 0$. Визначники Δ_n , Δ_{1n} і Δ_{2n} в (1) при $q^2 > 0$ мають вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta_n &= H_n^2(q\rho_1) \left\{ (nq_z/\rho_1)^2 (q_1^{-2} - q^{-2})^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\omega^2}{c^2} \left[\frac{1}{q_1} \frac{J'_n(q_1\rho_1)}{J_n(q_1\rho_1)} - \frac{1}{q} \frac{H'_n(q\rho_1)}{H_n(q\rho_1)} \right] \left[\frac{\varepsilon_1}{q_1} \frac{J'_n(q_1\rho_1)}{J_n(q_1\rho_1)} - \frac{\varepsilon}{q} \frac{H'_n(q\rho_1)}{H_n(q\rho_1)} \right] \right\}; \\ \Delta_{1n} &= H_n(q\rho_1) \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{nq_z c}{\rho_1 \omega} \left(\frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q^2} \right) f_{1n} + \left[\frac{1}{q_1} \frac{J'_n(q_1\rho_1)}{J_n(q_1\rho_1)} - \frac{1}{q} \frac{H'_n(q\rho_1)}{H_n(q\rho_1)} \right] i f_{2n} \right\}; \\ \Delta_{2n} &= H_n(q\rho_1) \frac{\omega}{c} \left\{ - \frac{nq_z c}{\rho_1 \omega} \left(\frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q^2} \right) f_{2n} + \left[\frac{\varepsilon_1}{q_1} \frac{J'_n(q_1\rho_1)}{J_n(q_1\rho_1)} - \frac{\varepsilon}{q} \frac{H'_n(q\rho_1)}{H_n(q\rho_1)} \right] i f_{1n} \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут $q_1^2 = \varepsilon_1 \omega^2 / c^2 - q_z^2$ – квадрат поперечного хвильового числа всередині циліндра; $f_{1n} = -E_{\varphi n}^e(\rho_1) - (nq_z/q_1^2 \rho_1) E_{zn}^e(\rho_1) - (i\omega/cq_1)(J'_n(q_1\rho_1)/J_n(q_1\rho_1))H_{zn}^e(\rho_1)$; $f_{2n} = H_{\varphi n}^e(\rho_1) + (nq_z/q_1^2 \rho_1) H_{zn}^e(\rho_1) - (i\omega\varepsilon_1/cq_1)(J'_n(q_1\rho_1)/J_n(q_1\rho_1))E_{zn}^e(\rho_1)$, $E_{\varphi n}^e(\rho)$ і $H_{\varphi n}^e(\rho)$ – електрична і магнітна азимутальні компоненти поля частинки відповідно. $J_n(q\rho)$ – циліндрична функція Бесселя n -го порядку першого роду. Штрих у циліндричних функцій означає їх похідні за аргументом, що обчислені при значенні відповідного аргументу.

При $q^2 < 0$ в визначниках в (2) функція Ханкеля ($H_n(q\rho)$) замінюється на функцію Макдональда ($K_n(q\rho)$), q^2 замінюється на $-k^2$ ($k^2 = -q^2 = q_z^2 - \varepsilon\omega^2/c^2$).

Перший та другий доданки у фігурній дужці в (1) описують втрати енергії частинки на збудження полів в безмежному середовищі. Третій та четвертий доданки визначають втрати енергії частинки на збудження хвиль у циліндрі. Рівність нулю визначника Δ_n являє собою дисперсійне рівняння власних коливань. Якщо діелектричні проникності ε і ε_1 не мають частотної дисперсії, то в такій системі існують власні об'ємно-поверхневі хвилі тільки у випадку, коли $q_1^2 > 0$, в іншому випадку ($q_1^2 < 0$) буде мати місце поверхнева хвиля.

Втрати енергії частинки dW_m/dt , що пролітає над ідеально-провідною циліндричною поверхнею, мають вигляд:

$$dW_m/dt = -e^2/v_z \int_0^\infty \omega \sum_n \left\{ \left[\beta^2 - (1 - n|\omega_H|/\omega) \right]^2 / \left[\beta^2 - (1 - n|\omega_H|/\omega) \right]^2 \right\} \times$$

$$\times \frac{J_n(q_0 \rho_0) N_n(q_0 \rho_1)}{J_n^2(q_0 \rho_1) + N_n^2(q_0 \rho_1)} [J_n(q_0 \rho_0) N_n(q_0 \rho_1) - J_n(q_0 \rho_1) N_n(q_0 \rho_0)] +$$

$$\left. + \frac{v_\varphi^2}{c^2} \frac{J'_n(q_0 \rho_0) N'_n(q_0 \rho_1)}{J_n'^2(q_0 \rho_1) + N_n'^2(q_0 \rho_1)} [J'_n(q_0 \rho_0) N'_n(q_0 \rho_1) - J'_n(q_0 \rho_1) N'_n(q_0 \rho_0)] \right\} d\omega,$$

де $N_n(q\rho)$ – функція Неймана, $q_0 = (\omega/v_z) \sqrt{\beta^2 - [1 - (n|\omega_H|/\omega)]^2}$ – поперечне хвильове число у вакуумі, $\beta = v_z/c$.

Втрати енергії зарядженої частинки, що рухається у вакуумі ($\varepsilon = 1$) по спіральній траєкторії поблизу бічної поверхні діелектричного циліндра з проникністю ε_1 , на збудження власних хвиль циліндра за виконання умови $\beta^2 \varepsilon_1 > (1 - n|\omega_H|/\omega)^2$ визначається виразом [4]:

$$\frac{dW_\Sigma}{dt} = - \frac{2e^2}{v_z c} \sum_n \sum_s \frac{1}{\Delta'_{n\omega}(\omega_p)} \frac{\omega_p}{k_p^2 \rho_1} \frac{K_n(k_p \rho_1)}{K_n(k_p \rho_0)} \left[\left(v_z + \frac{nq_{zp} v_\varphi}{\rho_0 k_p^2} \right) K_n(k_p \rho_0) \Delta_{1n} - \right.$$

$$\left. - \frac{\omega_p v_\varphi}{ck_p} \frac{\alpha}{\delta} K'_n(k_p \rho_0) \Delta_{2n} \right] \left[K_n(k_p \rho_0) \left(\frac{\omega_p v_z}{c^2} - q_{zp} \right) \delta + \frac{v_\varphi}{c} \alpha k_p K'_n(k_p \rho_0) \right],$$

$$\text{де } q_1^2 = \varepsilon_1 \omega^2 / c^2 - q_z^2; \quad \delta = \frac{\omega_p}{c} \left(\frac{1}{q_{1p}} \frac{J'_n(q_{1p} \rho_1)}{J_n(q_{1p} \rho_1)} + \frac{1}{k_p} \frac{K'_n(k_p \rho_1)}{K_n(k_p \rho_1)} \right);$$

$$\Delta'_{n\omega}(\omega_p) = \left. \frac{\partial \Delta_n}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_p}; \quad \alpha = (nq_{zp}/\rho_1) (q_{1p}^{-2} + k_p^{-2}); \quad q_{zp}, k_p \text{ і } q_{1p} - \text{значення } q_z, k \text{ і } q_1$$

на частоті власної хвилі циліндра ω_p . Модовий індекс $p \equiv ns$ (n і s – азимутальний і радіальний індекси відповідно). Частота ω_p визначається з умови рівності нулю виразу у фігурних дужках (2). Підсумовування за радіальним індексом s є обмеженим, оскільки кількість доданків, по суті, визначається кількістю точок перетину прямих $\omega = q_z v_z \pm n\omega_H$ і дисперсійних кривих $\Delta_n = 0$, що обумовлено резонансною взаємодією рухомої зарядженої частинки з власними модами циліндра.

Зазначимо, що у випадку, коли $\beta^2 \varepsilon_1 < (1 - n|\omega_H|/\omega)^2$ і ε_1 не має частотної дисперсії в структурі, що розглядається, відсутні власні коливання. Отже, заряджена частинка не втрачає енергію на збудження власних хвиль в структурі.

Залежності спектральних густин потужності втрат w_ν електрона на випромінювання від частоти при його русі в повздовжніх магнітних полях з напруженостями H_0 в безмежному середовищі з $\varepsilon = 1$ наведено на рис. 2(а) і над ідеально-провідним циліндром (w_m) – на рис. 2(б). В обох випадках з ростом частоти випромінюваної хвилі середній рівень втрат енергії частинки в одиницю часу спочатку зростає, а потім спадає. При цьому, чим більше значення напруженості зовнішнього магнітного поля, тим більша ширина смуги частот магнітогальмівного випромінювання. Осцилююча залежність спектральної густини втрат енергії від частоти пояс-

нюється обмеженістю частотних діапазонів спектральних складових та їх нерівнозначним внеском. Це особливо проявляється в області низьких частот, де нижчі гармоніки мають максимальний внесок.

Наявність ідеально-провідного циліндра спричинює зниження рівня втрат енергії частинки на магнітогальмівне випромінювання через наявність відбитої хвилі від поверхні циліндра. Необхідно відмітити, що чим більше радіус провідного циліндра і, відповідно, ларморівський радіус частинки, тим значно менші втрати енергії частинки на випромінювання. Сама наявність ідеально-провідного циліндра спричинює зниження рівня втрат енергії частинки в порівнянні з її рухом в безмежному вакуумному середовищі.

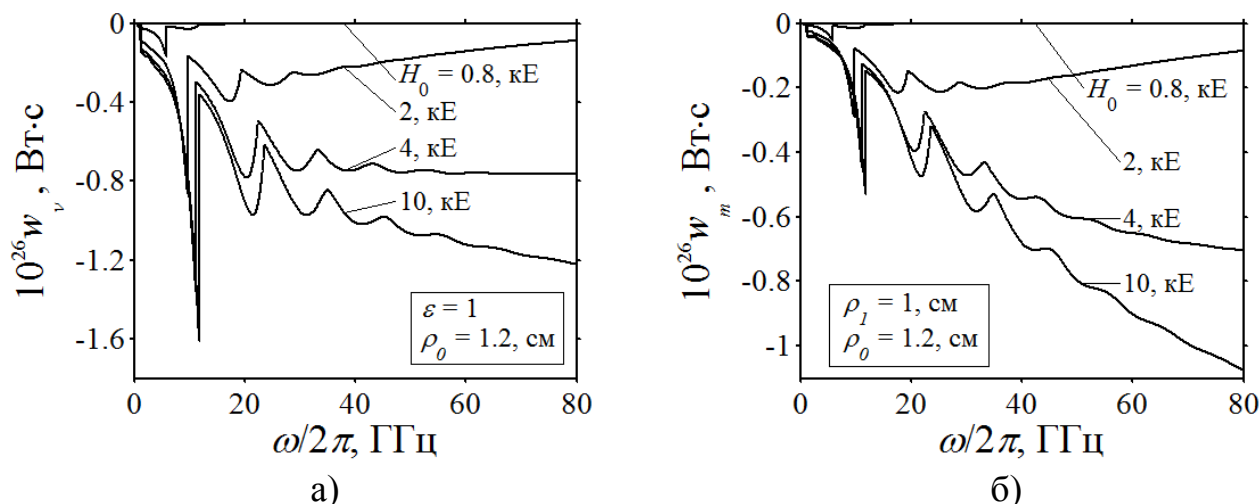


Рисунок 2 – Залежності спектральної густини втрат енергії від частоти випромінювання електрона, що рухається з повздовжньою швидкістю $v_z = 0,8c$ по спіральній траєкторії у вакуумі (а) і над металевим циліндром у вакуумі (б)

Згідно з (2) дисперсійні залежності власних симетричних мод Н- і Е-типів діелектричного циліндра визначаються розв'язками рівнянь

$$\Delta_0^H = 0 \text{ і } \Delta_0^E = 0,$$

$$\text{де } \Delta_0^H = (q_1 / (\beta^2 \varepsilon_1 - 1)) [J'_0(q_1 \rho_1) / J_0(q_1 \rho_1)] + (k / (1 - \beta^2)) [K'_0(k \rho_1) / K_0(k \rho_1)] \quad \text{і}$$

$$\Delta_0^E = (\varepsilon_1 q_1 / (\beta^2 \varepsilon_1 - 1)) [J'_0(q_1 \rho_1) / J_0(q_1 \rho_1)] + (k / (1 - \beta^2)) [K'_0(k \rho_1) / K_0(k \rho_1)].$$

Залежності частот власних симетричних хвиль ω_p (де $p \equiv 0s$) фторопластового ($\varepsilon_1 = 2,04$) циліндра від хвильового числа q_z наведено на рис. 3. Кільце з зарядом e_h рухається у вакуумі прямолінійно з повздовжньою швидкістю $v_z = 0,8c$ паралельно твірній діелектричного циліндра. Очевидно, що свою енергію кільце віддає в режимі резонансної черенковської взаємодії з полем власних хвиль циліндра (коли дисперсійні криві 1–3 перетинаються з прямою 4 на рис. 3).

Третій розділ присвячено збудженню плазмових коливань в циліндричних твердотільних структурах з двовимірним електронним газом. Розглянуто наступні структури: напівпровідник у вакуумі; напівпровідник чи діелектрик, на поверхню яких нанесено тонкий плазмовий шар і плазмовий шар у вигляді тонкої циліндричної поверхні. Заряджена частинка рухається в повздовжньому магнітному полі по спіральній траєкторії над циліндром.

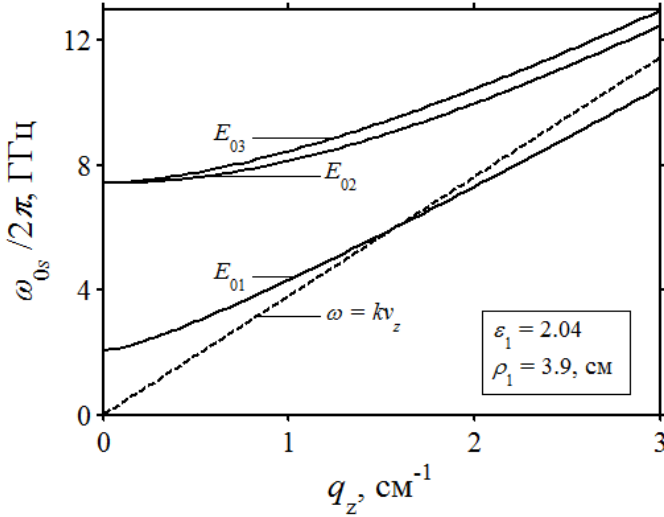


Рисунок 3 – Дисперсійні залежності власних симетричних мод фторопластового циліндра

$k = |q_z|$; $\omega_{0L}^2 = 4\pi e^2 N_{0S} / m_e \rho_1$ – квадрат плазмової (ленгмюрівської) частоти електронного 2D-шару; m_e – ефективна маса електронів провідності ($m_e = 0,014 \cdot m_0$); κ – поперечне (радіальне) хвильове число всередині напівпровідникового циліндра. Для напівпровідникового (3D-плазмового) циліндра ($\rho < \rho_1$), який розміщено у співвісному магнітному полі, компоненти тензора діелектричної проникності $\varepsilon_{ij}(\omega)$ (індекси i та j відповідають одному з напрямів уздовж осей координат ρ , φ і z) виражаються наступним чином:

$$\varepsilon_{\rho\rho}(\omega) = \varepsilon_{\varphi\varphi}(\omega) = \varepsilon_0 - \omega_L^2 / (\omega^2 - \omega_e^2); \quad \varepsilon_{\rho\varphi}(\omega) = -\varepsilon_{\varphi\rho}(\omega) = -i\omega_L^2 \omega_e / \omega(\omega^2 - \omega_e^2);$$

$$\varepsilon_{zz}(\omega) = \varepsilon_0 - \omega_L^2 / \omega^2; \quad \varepsilon_{\rho z}(\omega) = \varepsilon_{\varphi z}(\omega) = \varepsilon_{z\rho}(\omega) = \varepsilon_{z\varphi}(\omega) = 0,$$

де $\omega_L = \sqrt{4\pi e^2 N / m_e}$ і $\omega_e = |e| H_0 / m_e c$ – плазмова (ленгмюрівська) і циклотронна частоти електронів провідності, концентрація яких дорівнює N_0 ; ε_0 – діелектрична стала кристалічної решітки.

Розв'язок (3) визначає зв'язок власних частот структури і хвильових чисел власних хвиль. Оскільки в (3) $\kappa^2 = q_z^2 \varepsilon_{zz}(\omega) / \varepsilon_{\varphi\varphi}(\omega) < 0$, то рівняння характеризує власні хвилі напівпровідникового циліндра, поля яких мають об'ємний характер чи конфігурацію "шепечучої галереї". В цьому випадку в системі, що розглядається, існують об'ємно-поверхневі хвилі. У випадку $\kappa^2 > 0$ функції Бесселя та їх похідні ($J_n(|\kappa| \rho_1)$ і $J'_n(|\kappa| \rho_1)$) в рівнянні (3) замінюються функціями Інфельда та їх похідними ($I_n(\kappa \rho_1)$ і $I'_n(\kappa \rho_1)$), відповідно, а $|\kappa|$ замінюється на κ . При цьому власні хвилі циліндричної твердотільної структури є поверхневими.

Зазначимо, що у випадку напівпровідникового циліндра як з 2D-газом, так і без нього рішення (3) для мод з ідентичними розподілами полів, але з різними знаками азимутального індексу, не співпадають. Це свідчить про те, що хвилі, які поширюються в протилежних напрямках за азимутальною координатою, мають різні фазові швидкості (ω / q_z). В цьому проявляється принцип невзаємності поширення

Дисперсійні залежності власних хвиль напівпровідникового циліндра з 2D-газом на його бічній поверхні (3D+2D-плазмового циліндра), вісь симетрії якого паралельна вектору напруженості зовнішнього однорідного магнітного поля, визначаються розв'язком рівняння [5, 7, 17, 20]

$$\Delta_n = 0. \quad (3)$$

Тут

$$\Delta_n = \frac{K'_n(k\rho_1)}{K_n(k\rho_1)} - \varepsilon_{\rho\rho}(\omega) \frac{|\kappa| J'_n(|\kappa| \rho_1)}{k J_n(|\kappa| \rho_1)} -$$

$$- i\varepsilon_{\rho\varphi}(\omega) \frac{n}{k\rho_1} + \frac{\omega_{0L}^2 (n^2 + q_z^2 \rho_1^2)}{\omega^2 k \rho_1};$$

власних хвиль 3D- і 3D+2D-плазмового циліндра, що приводить до зняття частотного виродження за азимутальним індексом.

Чисельно досліджено наступні структури: напівпровідниковий (n-InSb: $\varepsilon_0 = 17,8$; $N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$) і діелектричний ($\varepsilon_0 = 17,8$) циліндри з 2D-газом і радіусом $\rho_1 = 0,5 \text{ см}$, а також плазмові 2D-шари, поверхневі концентрації електронів яких дорівнюють $N_{0S} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$, з радіусами ρ_1 , що дорівнюють $0,5 \text{ см}$ і $18 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.

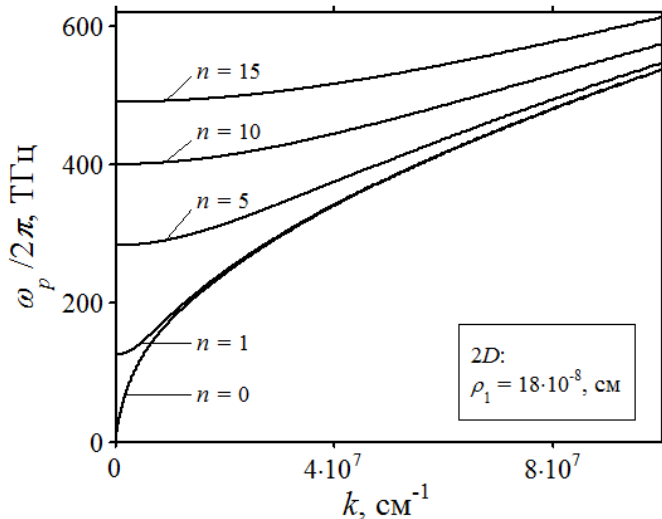


Рисунок 4 – Залежності власних частот нанотрубки від повздовжнього хвильового числа

представляють закон дисперсії хвилі заряду (зарядженого кільця), що рухається зі швидкістю $v_z = 0,8c$. Власні частоти напівпровідникової структури більше ніж в вісім разів перевищують частоти діелектричної структури з модами ідентичних розподілів полів (рис. 5). Наявність плазмового 2D-шару на бічній поверхні напівпровідникового циліндра приводить до збільшення міжмодового частотного інтервалу в спектрі у порівнянні зі спектром напівпровідникового циліндра без 2D-шару.

Резонансна взаємодія зарядженої частинки, що рухається, з електродинамічною структурою здійснюється, коли співпадають частоти і повздовжні хвильові числа хвиль зарядженої частинки і власних хвиль структури (ефект Вавилова–Черенкова). Так як в нашому випадку рух зарядженої частинки здійснюється по спіральній траєкторії в постійному повздовжньому однорідному магнітному полі, то виникає магнітогальмівне випромінювання. Частинка втрачає енергію на збудження хвиль в умовах магнітогальмівних резонансів, яким на діаграмі $\omega(q_z)$ відповідають точки перетину дисперсійних кривих, що отримані як розв'язки рівняння (3) в залежності від q_z , з прямою $\omega = q_z v_z + n\omega_H$ (ефект Доплера). Точки перетину мають координати (q_{zp}, ω_p) .

При ефекті Вавилова–Черенкова частинка втрачає енергію на збудження власних хвиль структур, що досліджуються, в умовах резонансів $\omega_p = q_{zp} v_z$. У випадку нормального ефекту Доплера, коли частота збуджуваної власної моди структури $\omega_p = q_{zp} v_z + n\omega_H$ (де $n\omega_H > 0$), а її фазова швидкість $\omega_p / q_{zp} > v_z$, магнітогальмівне випромінювання частинки здійснюється за рахунок енергії обертового руху елек-

На рис. 4 зображено залежності частот власних коливань з різними азимутальними індексами тонкого плазмового циліндра у вигляді нанотрубки ($\rho_1 = 18 \cdot 10^{-8} \text{ см}$). На рис. 5 зображено дисперсійні залежності плазмового циліндричного шару, але вже з радіусом $\rho_1 = 0,5 \text{ см}$. Видно, що власні частоти нанотрубки і плазмового шару відрізняються на три порядки. Наявність діелектричного циліндра приводить до додаткового зменшення значень власних частот і зменшення рівня крутизни дисперсійних кривих в порівнянні з плазмовим шаром. Прямі $\omega = kv_z$

трона. При аномальному ефекті Доплера частота збуджуваної хвилі в структурі $\omega_p = q_{zp} v_z - n\omega_H$ (де $n\omega_H > 0$) та її фазова швидкість $\omega_p / q_{zp} < v_z$. При цьому енергія поступального руху зарядженої частинки витрачається на збудження власної моди структури і збільшення енергії обертального руху частинки.

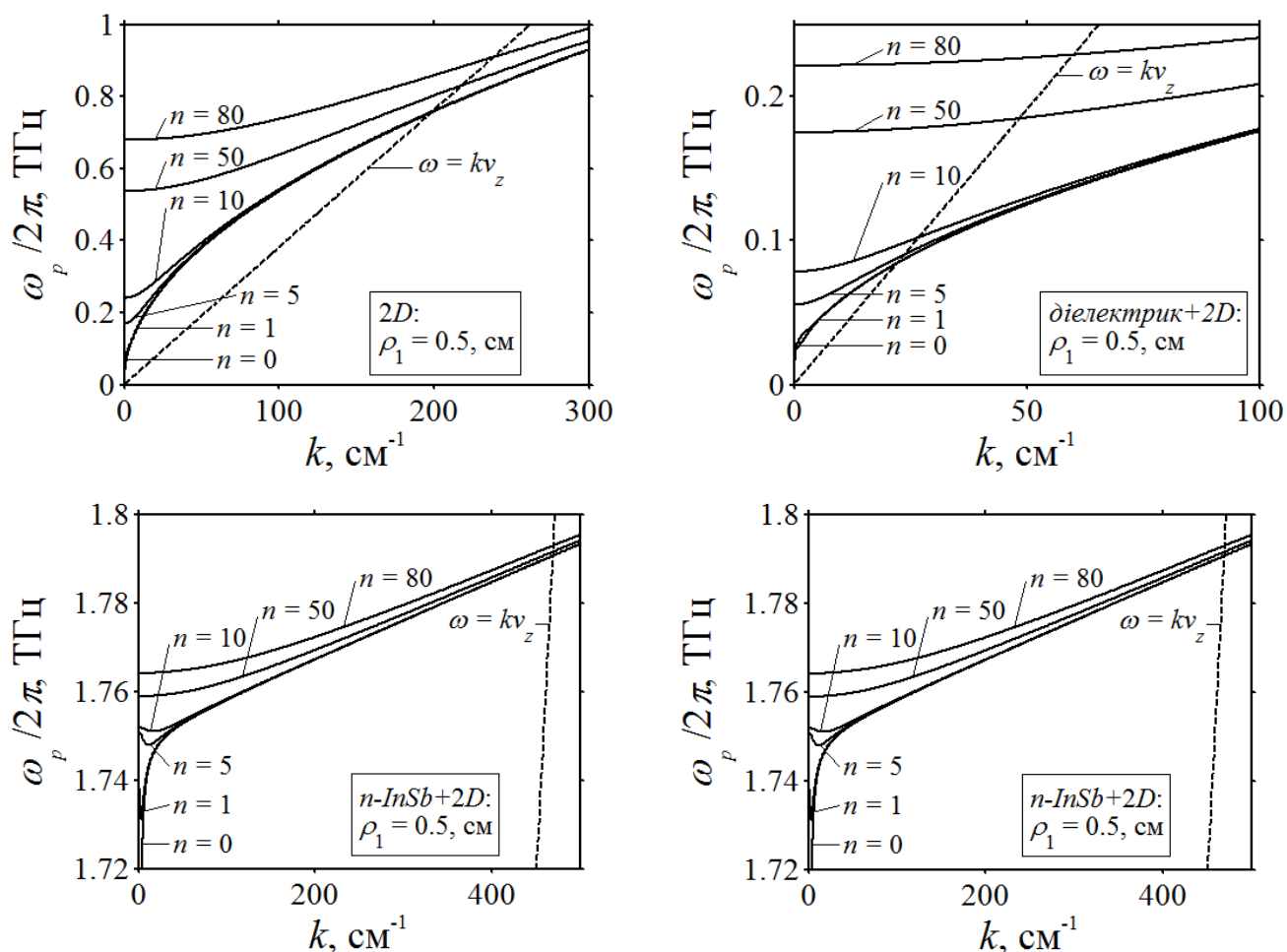


Рисунок 5 – Дисперсійні характеристики структур, що досліджуються

На рис. 6 наведено частоти збуджуваних мод з азимутальними індексами n в діелектричному циліндрі з 2D-газом на бічній поверхні (а) і циліндричному плазмовому 2D-шарі (б). Розглянуто збудження тільки поверхневих хвиль, радіальні хвильові числа яких задовольняють умові $\kappa^2 > 0$. Залежність частоти збуджуваної моди від азимутального індексу характеризується екстремумом, значення якого в системі з діелектричним циліндром з 2D-газом або циліндричним плазмовим 2D-шаром зменшується при збільшенні напруженості зовнішнього магнітного поля і зсувається в область вищих індексів, що обумовлено магнітогальмівним резонансом з вищою гармонікою. Повздовжнє хвильове число збуджуваної моди задовольняє співвідношенню $q_{zp} v_z = \omega_p - n\omega_H$. Отже, в електродинамічних системах, що досліджуються, підбором величини H_0 зовнішнього магнітного поля можна здійснювати селекцію збуджуваних мод.

На рис. 7 наведено залежності власних частот напівпровідникового циліндра з 2D-газом на бічній поверхні від модуля повздовжнього хвильового числа k і напруженості зовнішнього магнітного поля H_0 для двох значень азимутального індек-

су $n = -50$ (верхня поверхня) і $n = 50$ (нижня поверхня). При нульовій напруженості магнітного поля ($H_0 = 0$) відбувається перетин площин по лінії, яка є дисперсійною кривою гармоніки $n = 50$ (див. рис. 5). При збільшенні магнітного поля значення власних частот від'ємної гармоніки збільшуються, а додатної – зменшуються. Зі збільшенням значення хвильового числа різниця частот від'ємної і додатної гармонік зменшується.

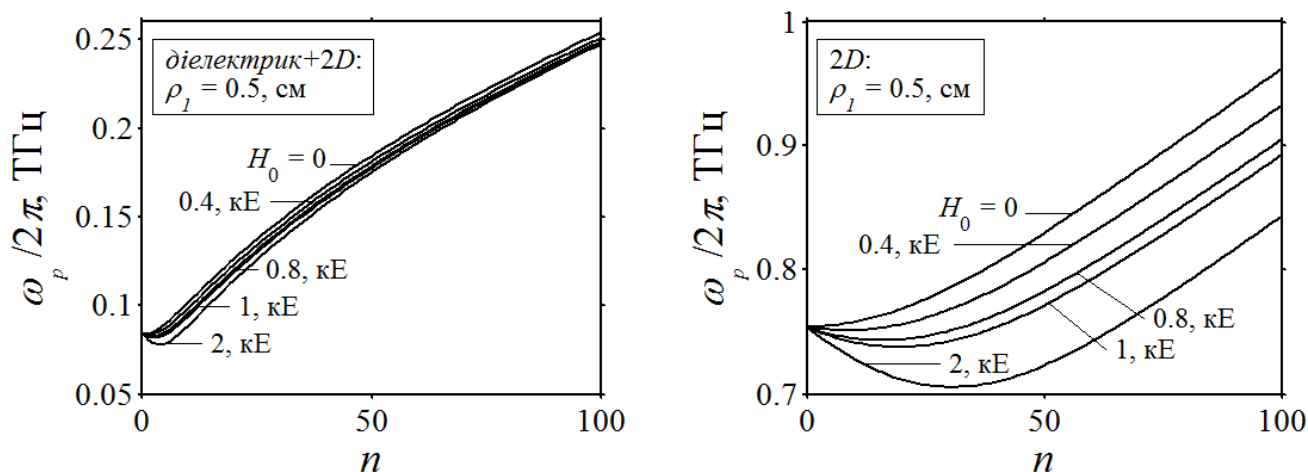


Рисунок 6 – Частоти збуджених поверхневих хвиль при різних H_0

В четвертому розділі розглянуто взаємодію зарядженої частинки, що рухається прямолінійно і рівномірно, з ізотропними циліндричними твердотільними 3D-

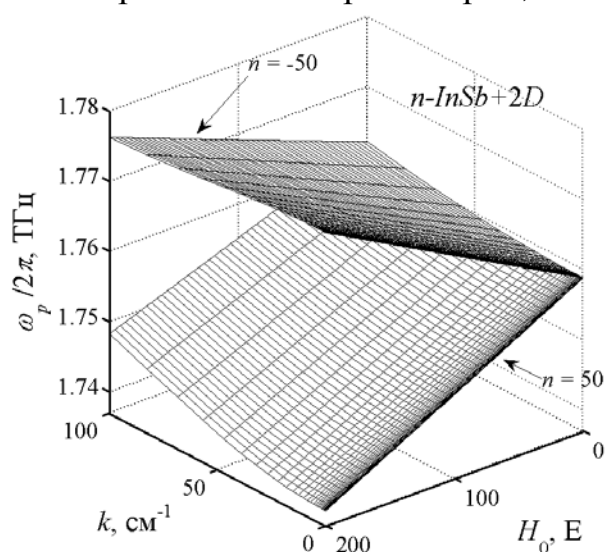


Рисунок 7 – Залежності власних частот n -InSb циліндра з 2D-газом на бічній поверхні від модуля повздовжнього хвильового числа і напруженості зовнішнього магнітного поля

всіх власних мод таких структур дорівнює одиниці. На рис. 8(а) наведено втрати енергії електрона, що рухається, на збудження поверхневих мод з азимутальними індексами $n = 0 - 100$ напівпровідникового і діелектричного циліндрів з 2D-газом, а також плазмового 2D-шару. Видно, що втрати енергії електрона зменшуються зі збільшенням хвильового азимутального числа.

і 3D+2D-плазмовими структурами. Втрати енергії частинки на збудження хвиль в структурах, що досліджуються, визначаються наступним чином:

$$\frac{dW_{\Sigma}}{dt} = -\frac{2e^2}{\rho_1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{K_n^2(k_{n1}\rho_0)}{K_n^2(k_{n1}\rho_1) \cdot |\Delta'_{n\omega}(\omega_p)|}, \quad (4)$$

де $k_{n1} = \omega_{n1} / v_z$ і $\Delta'_{n\omega}(\omega_p)$ – значення похідної $\partial\Delta_n / \partial\omega$ на частоті черенковського резонансу ω_p [5–7]. Частота $\omega_p \equiv \omega_{n1}$ збуджуваної моди з азимутальним індексом n визначається розв'язком рівняння $\Delta_n = 0$. В цьому випадку в системі реалізуються умови черенковських резонансів. Власні хвилі вказаних структур є поверхневими (так як їх радіальні хвильові числа задовольняють умові $\kappa^2 > 0$). Отже, радіальний індекс s

Мінімальні втрати енергії зарядженої частинки спостерігаються в циліндричній напівпровідниковій структурі з 2D-газом, максимальні мають місце в плазмовому 2D-шарі.

З формули (4) отримано вираз для втрат енергії кільця з зарядом e_h , що рухається зі швидкістю v_z на відстані ρ_0 від осі ізотропної циліндричної структури [6]: $dW_{01}/dt = -2e_h^2 / (\rho_1 |\Delta'_{0\omega}(\omega_p)|) K_0^2(k_{01}\rho_0) K_0^{-2}(k_{01}\rho_1)$, де $\omega_p \equiv \omega_{01}$. В цьому випадку збуджується симетрична поверхнева хвиля ($n=0$). При $\varepsilon(\omega)=1$ це співвідношення відображає втрати енергії зарядженого кільця на збудження циліндричного плазмового 2D шару [6].

На рис. 8(б) наведено залежності втрат енергії зарядженого кільця, що рухається, на збудження власних симетричних мод вказаних структур від радіуса циліндра ρ_1 . Радіус кільця змінювався відповідно з формулою $\rho_0 = 1,02\rho_1$. Заряд кільця e_h дорівнює $10^3 e$. Максимальні втрати енергії спостерігаються в структурах з радіусом ρ_1 в інтервалі 10^{-4} – 1 см.

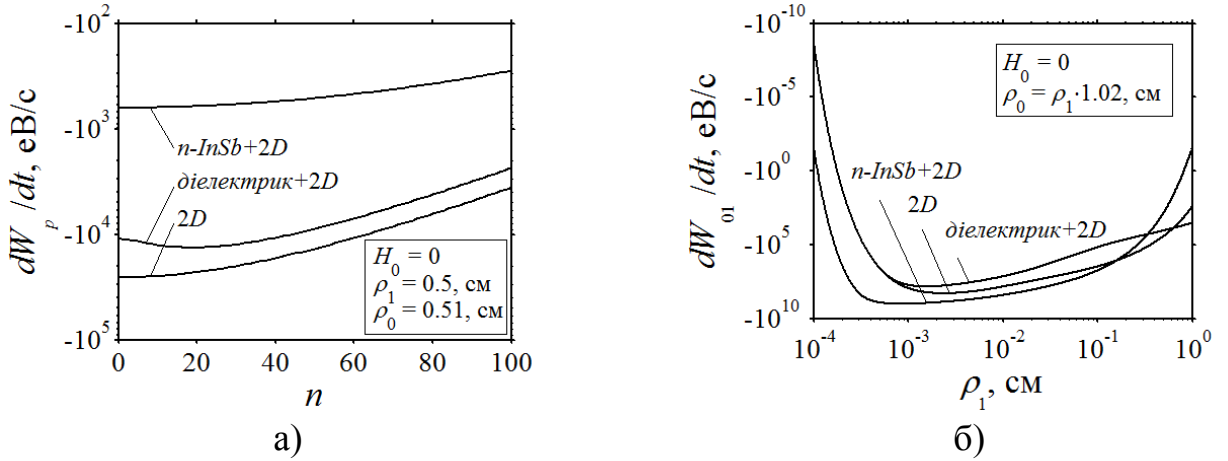


Рисунок 8 – Втрати енергії електрона на збудження поверхневих хвиль

Розглянуто рівномірний рух зарядженої частинки в каналі ізотропної циліндричної 3D+2D-плазмової структури або діелектричного циліндра з 2D-газом на бічній поверхні, а також 2D-плазмового шару ($\rho_0 = 0$).

Втрати енергії частинки на збудження плазмонів в 3D-плазмовому циліндрі з кінцевим радіусом без 2D-шару на частоті $\omega_{L\varepsilon} = \omega_L / \sqrt{\varepsilon_0}$ дорівнюють [6]

$$dW_{0s}^{(1)}/dt = -\left(2e^2 \omega_{L\varepsilon}^2 / v_z \varepsilon_0\right) \left(2 \ln(\kappa_c v_z / \omega_{L\varepsilon}) - K_0(k_{L\varepsilon} \rho_1) / I_0(k_{L\varepsilon} \rho_1)\right),$$

де $k_{L\varepsilon} = \omega_{L\varepsilon} / v_z$. На рис. 9(a) наведено потужність втрат електрона на збудження плазмонів в InSb циліндрі без 2D шару.

Втрати енергії частинки на збудження власних симетричних хвиль структур, що досліджуються, мають вигляд [6]:

$$dW_{0s}^{(2)}/dt = -2e^2 \omega_{01} F_0(\omega_{01}, \rho_1) K_0(k_{01} \rho_1) / [v_z \varepsilon(\omega_{01}) |\Delta'_{0\omega}(\omega_{01})|],$$

де $k_{01} = \omega_{01} / v_z$, а ω_{01} – частота черенковського резонансу.

Максимальні втрати енергії спостерігаються в напівпровідниковому циліндрі з 2D-газом і плазмовому 2D-шарі з радіусами ρ_1 в інтервалі 10^{-4} – 10^{-1} см, а в діелект-

ричному циліндрі з 2D-газом — 10^{-4} –1 см (рис. 9(б)). В перших двох структурах при $\rho_1 > 10^{-1}$ см втрати енергії електрона різко спадають, що обумовлено зменшенням ступеня взаємодії електричного поля електрона з межею розподілу середовищ.

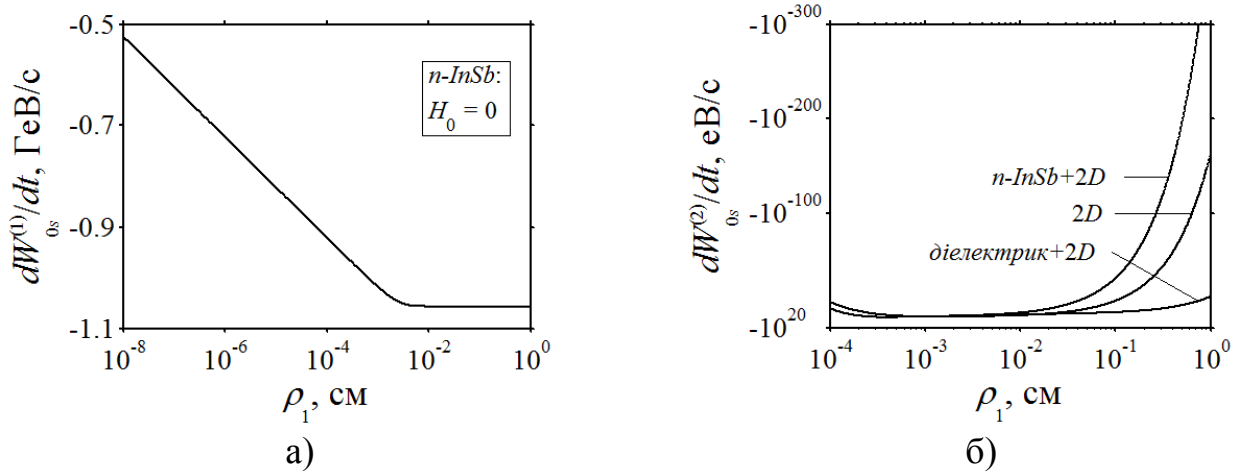


Рисунок 9 – Залежності потужності втрат електрона, що рухається в каналі, за одиницю часу від радіуса структури на збудження (а) плазмонів і (б) симетричних поверхневих хвиль

В п'ятому розділі показано можливість використання нових підходів для створення джерел електромагнітних коливань в міліметровому діапазоні довжин хвиль, що забезпечують освоєння терагерцевого діапазону частот. Розглянуто спосіб генерації і проведено дослідження мікрохвильового випромінювання в системі на основі резонатора з модами "шепочучої галереї", який збуджується азимутально-періодичним струмом релятивістського електронного пучка.

Чисельно і експериментально було досліджено циліндричний фторопластовий ($\varepsilon_1 = 2,04(1+1,7 \times 10^{-4}i)$) резонатор з радіусом $\rho_1 = 3,9$ см і повздовжнім розміром $L = 0,9$ см [1–3, 11–15]. На торцях резонатор обмежено плоскими провідними поверхнями. Забезпечено взаємодію трубчатого релятивістського електронного пучка (РЕП) з власними модами резонатора Е-типу, які мають модові індекси: азимутальний $n = 36$, радіальний $s = 1$ і аксіальний $l = 0; 1; 2$.

Власна частота $\omega_p = \omega'_p - i\omega''_p$ ЦДР з p -ю модою визначається розв'язанням дисперсійного рівняння [1–3, 11–15]

$$(\alpha_1 - \alpha_0)(\varepsilon_1 \alpha_1 - \alpha_0) = \xi^2.$$

$$\text{Тут } \alpha_1 = \frac{1}{q_1 \rho_0} \frac{J'_n(q_1 \rho_1)}{J_n(q_1 \rho_1)}; \alpha_0 = \frac{1}{q_2 \rho_0} \frac{H_n^{(1)'}(q_2 \rho_1)}{H_n^{(1)}(q_2 \rho_1)}; \xi = \frac{\omega_p q_z n (1 - \varepsilon_1)}{c (q_1 q_2 \rho_1)^2}; q_v^2 = q_p^2 - q_z^2, \text{ в}$$

Таблиця – Власні частоти і добротності ЦДР

	TM _{36 1 0}	HE _{36 1 1}	HE _{36 1 2}
$\omega'_p / 2\pi$, ГГц	34,9916	36,8385	42,0046
Q^E	4870	6035	6056

яких $q_p = \sqrt{\varepsilon_v \mu_v} \omega_p / c$, $q_z = l\pi / L$ і $p = nsl$, $v = 1, (\rho \leq \rho_1)$ або $v = 2, (\rho > \rho_1)$.

В таблиці наведено власні параметри резонатора з модами Е-типу.

Поля слабозгасаючих коливань "шепочучої галереї" (рис. 10) зосереджені всередині діелектрика поблизу циліндричної поверхні резонатора. Для збудження

коливань у діелектричному резонаторі необхідно внести в поле його власного коливання джерело змінної енергії, частота флуктуації якої дорівнює частоті власних коливань резонатора ω'_p .

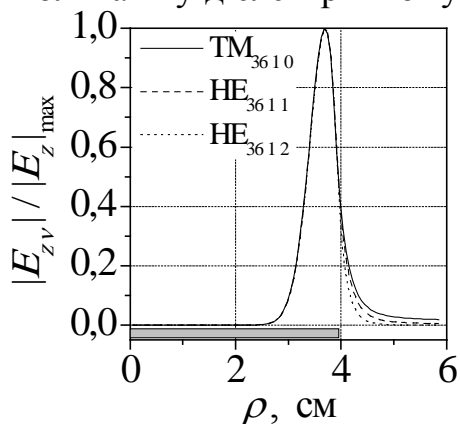


Рисунок 10 – Розподіл E_{zV} компонент HE- і TM-коливань в ЦДР

ками, паралельно бічній поверхні якого протікає азимутально-періодичний струм, що утворений 36 електронними струменями з кутовим рознесенням між ними в 10° .

Результати експерименту представлено на рис. 11. В результаті зареєстровано ВВЧ-випромінювання в діапазоні 35–42 ГГц. Здійснено селекцію робочих мод TM_{3610} , HE_{3611} і HE_{3612} [1, 11, 15].

Використання потоку електронів, який орієнтовано паралельно бічній поверхні резонатора, дозволяє збуджувати в ньому коливання E-типу. Селекція мод з конкретним значенням азимутального індексу n здійснюється при використанні азимутально-періодичного електронного пучка.

Електродинамічна система є діелектричним резонатором з торцевими провідними стінками,

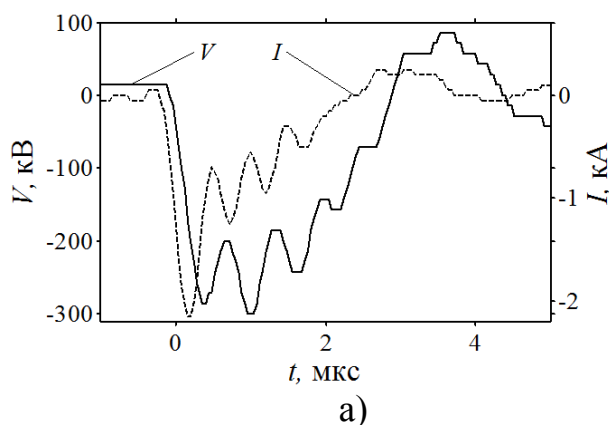


Рисунок 11 – Осцилограми напруги сильнотривового діода (V) і струму РЕП (I) (а) і нормованої потужності мікрохвильового випромінювання (P/P_{max}) (б)

ВИСНОВКИ

1. Набула розвиток теорія втрат енергії швидких зарядів на збудження власних хвиль в середовищах, які містять двовимірний електронний газ. Показано, що під час руху зарядженої частинки по спіральній траєкторії навколо твердотілого плазмподібного (напівпровідникового) циліндра з 2D-електронним газом на його бічній поверхні в системі збуджуються власні хвилі електростатичного походження. Встановлено, що в діелектричному циліндрі ці хвилі виникають тільки за наявності 2D-газу і є поверхневими. Зазначено, що власні електростатичні хвилі 3D- і 3D+2D-плазмових циліндрів, що розміщені в повздовжньому однорідному магнітному полі, є об'ємно-поверхневими або поверхневими в залежності від частотного діапазону. Власні хвилі плазмового 2D-шару є поверхневими. Виявлено, що в процесі руху зарядженої частинки вздовж осі напівпровідникового циліндра з 2D-газом окрім симе-

тричних хвиль збуджуються плазмони.

2. Показано, що власні хвилі електродинамічних циліндричних систем збуджуються в умовах черенковського і (або) магнітогальмівного резонансів(у). Збудження 3D+2D-плазмового циліндра здійснюється в умовах магнітогальмівних резонансів, коли співпадають частоти і повздовжні хвильові числа власних хвиль системи і хвиль зарядженої частинки при ефекті Доплера. Зазначено, що за допомогою зміни величини зовнішнього магнітного поля можна здійснювати селекцію збуджуваних мод.

3. Вперше виявлено ефект невзаємності збудження і поширення власних хвиль 3D+2D-плазмового (3D-плазмового) циліндра з ідентичними структурами розподілів полів, але з різними напрямками поширення за азимутальною координатою.

4. Продемонстровано можливість генерації слабозгасаючих електромагнітних коливань у надрозмірних ЦДР, коли їх поперечні розміри на порядок перевищують довжини генерованих хвиль. В такій системі експериментально здійснено збудження власних коливань "шепучої галереї" ЦДР в діапазоні 35–42 ГГц.

5. Вперше здійснено селекцію власних мод ЦДР при його збудженні азимутально-періодичним електронним пучком. Збуджено моди резонатора з азимутальним індексом $n = 36$ завдяки транспортуванню азимутально-періодичного 36-струминного потоку електронів над циліндричною поверхнею резонатора.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Автоколебательная система на основе диэлектрического резонатора с модами "шепчущей галереи" / А. В. Дормидонтов, А. Я. Кириченко, Ю. Ф. Лонин, А. Г. Пономарев, Ю. В. Прокопенко, Г. В. Сотников, В. Т. Уваров // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, Вып. 2. – С. 65-73.
2. Дормидонтов А. В. Влияние температуры окружающей среды на собственные частоты квазиоптического цилиндрического диэлектрического резонатора / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, Вып. 8. – С. 71-79.
3. Дормидонтов А. В. Влияние индекса рефракции и температуры окружающей среды на собственные частоты квазиоптических цилиндрических диэлектрических резонаторов / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко // Изв. вузов Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 6. – С. 428-442.
4. Потери энергии заряженной частицы, движущейся по спиральной траектории / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко, С. И. Ханкина, В. М. Яковенко // Радиофизика и электроника. – 2014. – Т. 5(19), № 1. – С. 29-41.
5. Потери энергии заряженной частицы на возбуждение собственных волн в цилиндрических структурах с двумерным электронным газом / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко, С. И. Ханкина, В. М. Яковенко // Радиофизика и электроника. – 2014. – Т. 5(19), № 4. – С. 63-72.
6. Потери энергии быстрых зарядов в структурах с двумерным электронным газом / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко, С. И. Ханкина, В. М. Яковенко // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, Вып. 7. – С. 125-132.
7. Дормидонтов А. В. Потери энергии заряженной частицы на возбуждение волн в

- полупроводниковом цилиндре с двумерным электронным газом на боковой поверхности / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко, В. М. Яковенко // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6(20), № 4. – С. 24-30.
8. Дормидонтов А. В. Вынужденные колебания в диэлектрическом шаре при возбуждении кольцевым модулированным током / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов // Матер. 19-ой междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" – КрыМиКо, 2009 (г. Севастополь). – 2009. – Т. 2. – С. 525-526.
 9. Dormidontov A. V. Excitation of spherical dielectric resonator by ring periodical current / A. V. Dormidontov, Yu. V. Prokopenko, Yu. F. Filipov // Proc. of the 7-th Inter. Kharkov Symp. MSMW*2010 (Kharkov, Ukraine). – 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
 10. Дормидонтов А. В. Спектр диэлектрического шарового резонатора, возбуждаемого азимутально-периодическим электрическим током / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов // Матер. 20-ой междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" – КрыМиКо, 2010 (г. Севастополь). – 2010. – Т. 2. – С. 673-674.
 11. Автоколебательная система на основе диэлектрического резонатора с модами "шепчущей галереи" / А. В. Дормидонтов, А. Я. Кириченко, Ю. Ф. Лонин, А. Г. Пономарев, Ю. В. Прокопенко, Г. В. Сотников, В. Т. Уваров // Матер. 21-ой междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" – КрыМиКо, 2011 (г. Севастополь). – 2011. – Т. 1. – С. 277-278.
 12. Дормидонтов А. В. Квазиоптический цилиндрический резонатор как датчик рефрактометра / А. В. Дормидонтов, Е. В. Кривенко, Ю. В. Прокопенко // Матер. 22-ой междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" – КрыМиКо, 2012 (г. Севастополь). – 2012. – Т. 2. – С. 847-848.
 13. Dormidontov A. V. Sensor for two-resonator refractometer / A. V. Dormidontov, Yu. V. Prokopenko // Proc. of the 8-th Inter. Kharkov Symp. MSMW*2013 (Kharkov, Ukraine). – 2013. – P. 543-545. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
 14. Дормидонтов А. В. Сенсор двухрезонаторного рефрактометра / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко // Матер. 23-ой междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" – КрыМиКо, 2013 (г. Севастополь). – 2013. – Т. 2. – С. 976-977.
 15. Application of the Quasi-Optical Dielectric Resonator in the Resonant Auto-Oscillatory System / A. V. Dormidontov, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, Yu. V. Prokopenko // Proc. of the 12-th Int. Conf. TCSET*2014 (Lviv-Slavske, Ukraine). – 2014. – P. 176.
 16. Energy losses analysis of charged particle moving in inhomogeneous medium / A. V. Dormidontov, Yu. V. Prokopenko, S. I. Khankina, V. M. Yakovenko // Proc. of the 20-th Int. Conf. MIKON*2014 (Gdansk, Poland). – 2014. – Vol. 2. – P. 719-722.
 17. Собственные частоты цилиндрических структур с плазменным слоем / А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко, С. И. Ханкина, В. М. Яковенко // Матер. 24-ой междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" – КрыМиКо, 2014 (г. Севастополь). – 2014. – Т. 2. – С. 633-634.
 18. The Energy Loss of High-Velocity Charges in the Structures with Two-Dimensional

Electron Gas / A. V. Dormidontov, Yu. V. Prokopenko, S. I. Khankina, V. M. Yakovenko // Proceedings of the 15-th Inter. Conf. MMET*2014 (Dnipropetrovsk, Ukraine). – 2014. – P. 209-212.

19. Study of energy loss of charged particle on eigen modes in the cylindrical structure with thin plasma layer on its lateral surface / A. V. Dormidontov, Yu. V. Prokopenko, S. I. Khankina, V. M. Yakovenko // Proceedings of the 14-th YSC*2014 (Kharkov, Ukraine). – 2014. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM)
20. Dormidontov A. V. Excitation of Waves in a Semiconductor Cylinder with 2D-Gas on the Side Surface by a Charged Particle moving along the Spiral Path around the Cylinder / A. V. Dormidontov, Yu. V. Prokopenko, V. M. Yakovenko // Proc. of the 9-th Inter. Kharkov Symp. MSMW*2016 (Kharkov, Ukraine). – 2016. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM)

АНОТАЦІЯ

Дормідонтов А. В. Взаємодія заряджених частинок і електромагнітних хвиль в циліндричних твердотільних структурах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2019.

Дисертацію присвячено дослідженню процесів взаємодії рухомих заряджених частинок та електромагнітних полів, що формуються в різних електродинамічних структурах циліндричної конфігурації, у тому числі плазмоподібних, або які містять плазмоподібне середовище.

Отримано вирази для втрат енергії заряду, що рухається по спіральній траєкторії у зовнішньому магнітному полі, за допомогою яких можна визначити втрати енергії при обертальному і при поступальному русі частинки або зарядженого кільця, що охоплює циліндр. Отримано умови збудження власних поверхневих та об'ємно-поверхневих хвиль у діелектричному циліндрі.

Встановлено, що в діелектричному циліндрі власні хвилі електростатичного походження збуджуються тільки при наявності 2D-газу і є поверхневими, так само, як і хвилі плазмового 2D-шару. Показано, що хвилі в 3D- та 3D+2D-плазмових циліндрах є об'ємно-поверхневими або поверхневими залежно від частотного діапазону. Зазначено, що за допомогою зміни величини зовнішнього магнітного поля можна здійснювати селекцію збуджуваних мод.

Виявлено ефект невзаємності збудження та поширення власних хвиль 3D+2D-плазмового (3D-плазмового) циліндра з ідентичними структурами розподілу полів, але які відрізняються напрямком поширення вздовж азимутальної координати.

Досліджено черенковські механізми збудження поверхневих хвиль у циліндричних структурах з 2D-газом. Встановлено, що під час руху зарядженого кільця, що охоплює нанотрубку, збуджуються тільки аксіально-симетричні поверхневі хвилі. Показано, що в процесі руху зарядженої частинки вздовж осі напівпровідникового циліндра з 2D-газом збуджуються об'ємні плазмони.

Запропоновано спосіб генерації ВВЧ-випромінювання в системі з азимутально-періодичним струмом релятивістського електронного пучка, що збуджує високочастотний циліндричний фторопластовий резонатор. Здійснено селекцію несиметричних мод "шепочучої галереї" ЦДР.

Ключові слова: випромінювання Вавилова-Черенкова, магнітогальмівний резонанс, втрати енергії частинки, двовимірний електронний газ, ефект Доплера, об'ємно-поверхневі хвилі, мікрохвильове випромінювання, селекція власних мод.

АННОТАЦІЯ

Дормидонтов А. В. Взаимодействие заряженных частиц и электромагнитных волн в цилиндрических твердотельных структурах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена исследованию процессов взаимодействия движущихся заряженных частиц и электромагнитных полей, формирующихся в различных электродинамических структурах цилиндрической конфигурации, в том числе плазмopodobных или содержащих плазмopodobную среду.

Получены выражения для потерь энергии движущегося по спиральной траектории заряда во внешнем магнитном поле и показано, что они имеют универсальный характер, с помощью которых можно определить потери как при вращательном, так и при поступательном движении частицы или заряженного кольца, охватывающего цилиндр. Получены условия возбуждения собственных поверхностных и объемно-поверхностных волн в диэлектрическом цилиндре.

Установлено, что в диэлектрическом цилиндре собственные волны электростатического происхождения возникают только при наличии 2D-газа и являются поверхностными, так же, как и волны плазменного 2D-слоя. Показано, что волны в 3D- и 3D+2D-плазменных цилиндрах являются объемно-поверхностными или поверхностными в зависимости от частотного диапазона. Отмечено, что посредством изменения величины внешнего магнитного поля можно осуществлять селекцию возбуждаемых мод.

Обнаружен эффект невзаимности возбуждения и распространения собственных волн 3D+2D-плазменного (3D-плазменного) цилиндра с идентичными структурами распределения полей, но отличающиеся направлением распространения по азимутальной координате.

Исследованы черенковские механизмы возбуждения поверхностных волн в цилиндрических структурах с 2D-газом. Установлено, что при движении заряженного кольца, охватывающего нанотрубку, возбуждаются только аксиально-симметричные поверхностные волны. Показано, что при движении заряженной частицы вдоль оси полупроводникового цилиндра возбуждаются объемные плазмоны.

Предложен способ генерации КВЧ-излучения в системе с азимутально-

периодическим током релятивистского электронного пучка, возбуждающим высокочастотный цилиндрический фторопластовый резонатор. Осуществлена селекция несимметричных мод "шепчущей галереи" ЦДР.

Ключевые слова: излучение Вавилова-Черенкова, магнитотормозной резонанс, потери энергии частицы, двумерный электронный газ, эффект Доплера, объемно-поверхностные волны, микроволновое излучение, селекция собственных мод.

ABSTRACT

Dormidontov A. V. Interaction between charged particles and electromagnetic waves in the cylindrical solid-state structures. – The manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of Physical and Mathematical Sciences by speciality 01.04.03 – Radiophysics. – A. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis is devoted to the study of the interaction processes between moving charged particles moving along a spiral trajectory in an external magnetic field and electromagnetic fields, which are formed in various electrodynamic structures of cylindrical configuration, including plasma-like or containing plasma-like medium.

Expressions for the energy loss by a charge moving along a spiral trajectory in an external magnetic field have been obtained and it is shown that they are multi-purposes. They allow to determine the energy loss by both a rotational particle and a translational motion particle, as well as by a charged ring that surrounds a cylinder. The conditions for the excitation of surface and bulk-surface eigenwaves of dielectric cylinder have been obtained.

It is established that in a dielectric cylinder electrostatic eigenwaves are surface and occur only in the presence of a 2D-gas, as well as waves of 2D plasma layer. It is shown that waves in 3D and 3D+2D plasma cylinders are bulk-surface or surface depending on the frequency band. It is noted that the selection of the excited modes can carry out by changing the magnitude of external magnetic field.

The nonreciprocity effect for an excitation and a propagation of 3D+2D plasma (3D plasma) cylinder eigenwaves with identical field distribution, but with different propagation directions along the azimuthal coordinate has been found.

The Cherenkov excitation mechanisms of surface waves in cylindrical structures with 2D-gas have been investigated. It is established that when a charged ring moves along a nanotube only axially symmetric surface waves are excited. It is shown the plasmons are excited when a charged particle moves along the semiconductor cylinder axis.

Generation method of EHF radiation has been suggested in a system with an azimuthally-periodic current of relativistic electron beam that excites a high-quality cylindrical Teflon resonator. The selection of asymmetric whispering gallery modes of the cylindrical dielectric resonator was carried out.

Keywords: Cherenkov radiation, gyrosynchrotron resonance, energy loss by a particle, 2D electron gas, Doppler effect, bulk-surface waves, microwave radiation, selection of eigenmodes.