

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО–ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**



Приступа Валерій Іванович

УДК 537.533.7; 537.86

**ЗБУДЖЕННЯ КОГЕРЕНТНИХ КІЛЬВАТЕРНИХ ПОЛІВ У
ДІЕЛЕКТРИЧНИХ, ПЛАЗМОВИХ ТА ПЛАЗМОВО-ДІЕЛЕКТРИЧНИХ
МУЛЬТИБАНЧЕВИХ КІЛЬВАТЕРНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ**

01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико–математичних наук

Харків–2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико–математичних наук, професор,
чл.-кор. НАН України
Онiщенко Іван Миколайович,
Інститут плазмової електроніки та нових методів прискорювання
Національного наукового центру «Харківський фізико–технічний
інститут» НАН України,
заступник директора з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор фізико–математичних наук, професор
Куклін Володимир Михайлович,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
МОН України,
завідувач кафедри штучного інтелекту та програмного
забезпечення

доктор фізико–математичних наук, професор
Пономарьов Олександр Георгійович,
Інститут прикладної фізики НАН України,
завідувач відділу фізики пучків заряджених частинок

Захист дисертації відбудеться «___» _____ 2018 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01 Національного наукового центру «Харківський фізико–технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1, конференц–зал.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного наукового центру «Харківський фізико–технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

Автореферат розісланий «___» _____ 2018 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01



Мануйленко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Фундаментальні проблеми фізики високих енергій на даний час вирішуються з використанням адронних і лептонних колайдерів з енергією в системі центру мас TeV діапазону. Важливою подією стало відкриття на Великому адронному колайдері (ВАК) з енергією зустрічних пучків протонів 7 TeV елементарної частинки, яка з великою вірогідністю є Хіггс-бозоном, що відповідає за наявність маси у елементарних частинок і була необхідною для досягнення повноти стандартної моделі. Для подальшого дослідження властивостей цієї елементарної частинки та отримання відповіді на глибокі фундаментальні питання щодо походження маси, переважання матерії над антиматерією, існування суперсиметрії та інше виникає необхідність підвищення енергії і світності іонних пучків на ВАК і спорудження лінійних колайдерів електронів і позитронів на TeV енергії - Міжнародного лінійного колайдера (МЛК) у Японії та Компактного лінійного колайдера (КЛК) у Швейцарії. Однак наявні колайдери громіздські і дорогі. Заплановані для будівництва колайдери вже вимагають спільних зусиль і фінансових витрат багатьох країн. Очевидно, що підходи до прискорення заряджених частинок, засновані на традиційних методах прискорення в металевих структурах, що прискорюють полями існуючих джерел НВЧ-випромінювання, мають обмеження по темпу прискорення через НВЧ пробій і повністю себе вичерпали. Для створення майбутніх колайдерів **актуальною** є проблема розробки нових методів прискорення, які дозволяють радикально збільшити темп прискорення, що істотно зменшить габарити колайдерів і їх вартість. Прискорюючі поля, які на 3 порядки перевершують традиційні до 1 MeV/cm, можуть бути створені в плазмі (напруженість поля розділених зарядів $E(V/cm) \approx \sqrt{n}$, $n(cm^{-3})$ – густина плазми) без небезпеки обмеження НВЧ-пробоем, принципово відсутнім в плазмі. Така ідея вперше висловлена Я.Файнбергом в 1956 р, який запропонував використовувати плазмовий хвилевід як прискорюючу структуру¹. Розробка ТВт-ПВт лазерів і сильноточкових колайдерів дала можливість використати їх як драйвери для генерації сильних полів у плазмі. Дж.Даусон із співавторами модифікували ідею Я.Файнберга колективного прискорення в схему кільватерного прискорення, у якій високоградієнтним прискорюючим полем є кільватерне поле, що збуджується у плазмі потужним лазерним імпульсом (в 1979р.)² або електронним згустком з великим зарядом (у 1985 р.)³. Після цього дослідження кільватерного прискорення заряджених частинок було широко розгорнуто в 37 лабораторіях багатьох країн світу. Концепція кільватерного прискорення з використанням діелектричних прискорюючих структур також активно досліджується в лаборато-

¹ Fainberg Ya.B. The use of plasma wave guides as accelerating structures // Proc. Symposium CERN, Geneva. 1956. V.1, P.84- 92.

² Tajima T., Dawson J.M. Laser electron acceleration // Phys. Rev. Letters. 1979. V. 43, № 4. P. 267-270.

³ Chen P., Dawson J.M., Huff R., Katsouleas T. Acceleration of electrons by the interaction of a bunched electron beam with a plasma // Phys. Rev. Letters. 1985. V. 54, № 7. P. 692-695

ріях США, Японії та Ізраїлю. Підняття порогового поля НВЧ-пробою в цьому випадку досягається скороченням тривалості лазерного імпульсу чи довжини електронного згустку.

У дисертації подані експериментальні дослідження процесів збудження кільватерних полів регулярною послідовністю релятивістських електронних згустків у діелектричній структурі, в плазмі та в гібридній плазмово-діелектричній структурі, а також прискорення в них згустків, інжекттованих в прискорюючі фази. Зокрема, експериментально доведена когерентність збуджуваних кільватерних полів, яка дозволяє для збудження великого прискорюючого поля замість одного драйверного згустку з великим зарядом використовувати регулярну послідовність згустків з еквівалентним сумарним зарядом. Отримані експериментальні результати сприяють вирішенню **актуальної** проблеми радикального зменшення габаритів і вартості суперколайдерів ТеВ діапазону енергії, покликаних для рішення фундаментальних проблем фізики високих енергій, а також створенню компактних прискорювачів для промисловості, матеріалознавства, медицини та біології.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут». Результати, наведені в дисертації, отримано в рамках виконання планових бюджетних та проектних науково-дослідних робіт:

а) «Програма фундаментальних досліджень ННЦ ХФТІ з атомної науки і техніки до 2010 р.», № д/р 80906UP0010 в рамках теми: «Експериментальні дослідження по розробці концепції прискорювачів нового типу, заснованих на збудженні кільватерних полів в діелектрику і в плазмі», (шифр теми ІІІ-2-06), ІПЕНМП ННЦ ХФТІ, (2006–2010 рр.). Виконувалась за Постановою засідання Бюро Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України, протокол №16 від 13.06.2005 р.

б) «Програма фундаментальних досліджень ННЦ ХФТІ з атомної науки і техніки до 2015 р.», № д/р 0112U002025 в рамках теми: «Експериментальне дослідження нових методів прискорення, заснованих на полях, збуджуваних послідовністю електронних згустків або лазерним імпульсом», (шифр теми ІІІ-1-11), ІПЕНМП ННЦ ХФТІ, (2011–2015 рр.). Виконувалась за Постановою засідання Бюро Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України, протокол №7(76) від 07.10.2010 р.

в) «Програма фундаментальних досліджень ННЦ ХФТІ з атомної науки і техніки до 2020 р.», № д/р 0116U006484 в рамках теми: «Експериментальне дослідження нових методів прискорення, заснованих на кільватерних полях, збуджуваних послідовністю релятивістських електронних згустків в діелектричних і плазмових структурах» (шифр теми ІІІ-1-16), ІПЕНМП ННЦ ХФТІ, (2016–2020 рр.). Виконується за Постановою Бюро ВЯФЕ НАН України від 01.07.2015 р. протокол № 4(110), п. 2.

г) Партнерська угода по проекту P522 УНТЦ (ANL -T2-247-UA) між Програмою по нерозповсюдженню озброєння Міністерства енергетики США та

Українським науково-технологічним Центром і Національним науковим центром «Харківський фізико-технологічний інститут», 2012- 2014 рр.

д) Цільова комплексна програми НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» у 2014 – 2016 рр.: проекти П-1 / 63-2014, П-2/ 63-2015, П-3 / 63-2016.

ж) Цільова комплексна програми НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» у 2017 – 2019 рр.: проект П-1 / 63-2017.

Дисертант у даних роботах виступав виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є експериментальне збудження когерентних кільватерних полів регулярною послідовністю релятивістських електронних згустків у діелектричних, плазмових і плазмово-діелектричних структурах для високоградієнтного прискорення заряджених частинок.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити **наступні задачі**:

1) Дослідити інтерференцію кільватерних полів, збуджуваних в прискорюючих структурах окремими згустками регулярної послідовності, для чого необхідно виміряти сумарні кільватерні поля всієї послідовності на виході відрізка хвилеводу різної довжини. Оскільки кількість згустків, кільватерні поля яких додаються, залежить від довжини хвилеводу, такі експерименти еквівалентні вимірюванням залежності сумарного кільватерного поля від числа згустків в послідовності і дають можливість з'ясувати ступінь когерентності збуджених полів.

2) З використанням високошвидкісного осцилографа з пропускнуою здатністю 15 ГГц отримати безпосередньо реалізацію НВЧ-сигналу кільватерного поля та порівняти її параметри для різних довжин хвилеводу і отже визначити результат додавання кільватерних полів різної кількості згустків.

3) Створити «резонансну» плазму (плазмова частота співпадає з частотою слідування згустків) при інжекції згустків в нейтральний газ різного тиску. За умови когерентності ефективність збудження плазмових кільватерних полів повинна бути найбільшою.

4) Розробити метод збудження кільватерних полів однією частиною згустків і прискорення другої частини згустків однією і тією ж послідовністю без використання окремого інжектора. Це дозволить продемонструвати експериментально кільватерне прискорення заряджених частинок.

5) Використати резонатор для збільшення кількості згустків, кільватерні поля яких дають вклад в сумарне поле, на противагу відрізку діелектричного хвилеводу, в якому кількість таких згустків мала через вихід кільватерних полів з груповою швидкістю з кінця хвилеводу.

6) Виявити переваги гібридних плазмово-діелектричних структур, в яких розділені функції діелектричного і плазмового кільватерних полів – першого для прискорення, другого для фокусування, для оптимізації одночасного прискорення і фокусування прискорюваних згустків.

Об'єктом дослідження є когерентні кільватерні поля, збуджувані періодичною послідовністю релятивістських електронних згустків, та розробка кільватерного методу високоградієнтного прискорення заряджених частинок.

Предметом дослідження є інтерференція кільватерних полів окремих згустків послідовності; когерентність кільватерних полів; прискорення згустків у збуджених кільватерних полях; фокусування згустків в кільватерних полях плазмово-діелектричної структури.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети були використані стандартні методи фізики пучків заряджених частинок та фізики плазми, а саме – методи вимірювання щільності плазми відкритим бочкоподібним резонатором (ВБР) та високочастотним зондом Джонсена; поздовжньої складової збуджуваних кільватерних полів НВЧ-зондом, детектований сигнал з якого фіксувався осцилографом GDS-840C з пропускнуою здатністю 300 МГц. Для спостереження безпосередньої реалізації збудженого кільватерного поля використовувався високошвидкісний осцилограф з пропускнуою здатністю 15 ГГц фірми. Процеси кільватерного прискорення досліджувались з використанням магнітних аналізаторів, за допомогою яких вимірювались енергетичні спектри електронів згустків до і після їх взаємодії з діелектричною, плазмовою та плазмово-діелектричною структурою. Фокусування електронних згустків визначалось циліндрами Фарадея або з використанням відбитків електронних згустків на скляних пластинах.

Наукова новизна одержаних результатів: До найбільш суттєвих нових наукових результатів, вперше отриманих здобувачем, належать такі:

- Експериментально доведена когерентність кільватерних полів, збуджуваних у прискорюючих структурах на черенковському резонансі окремими згустками резонансної послідовності (частота слідування згустків співпадає з частотою збудженого поля), зумовлена однаковою частотою та кратною 2π початковою фазою збуджуваних полів. Частота визначається черенковським резонансом згустків з власною хвилею структури, а її початкова фаза нав'язується однаковою кожним згустком з повтором через період їх слідування. Експериментальним доказом цього твердження є вимірювання сумарного кільватерного поля всієї послідовності на виході відрізка хвилевода різної довжини. Так як збуджене згустком поле полишає хвилевод з груповою швидкістю v_g , то кількість згустків послідовності, кільватерні поля яких додаються, залежить від довжини хвилеводу L : $N=(L/\Delta) (v_0/v_g-1)$, де Δ - відстань між згустками, v_0 – швидкість згустку. Змінюючи довжину хвилеводу, отримано величину кільватерного поля 1-го, 2-х, 3-х і т. д. згустків з доказом повного додавання їх кільватерних полів, що свідчить про їх когерентність.
- З використанням високошвидкісного осцилографа з пропускнуою здатністю 15 ГГц отримано безпосередньо реалізацію сигналу 3 ГГц кільватерного поля в режимах 1-го, 2-х, 3-х і т.д. згустків і підтверджено додавання когерентних полів окремих згустків послідовності.
- Експериментально доведено, що на відміну від хвилеводу, в якому кількість

згустків, кільватерні поля яких дають вклад в сумарне поле, через винос збудженого поля з кінця хвилеводу обмежується довжиною хвилеводу, у випадку резонатора збуджені поля не залишають резонатор. В лінійному режимі (згустки залишаються у вихідних фазах), що реалізується в умовах експерименту, і при співпадінні частоти поля з власними частотами резонатора кількість згустків, які дають вклад в сумарне поле, обмежується тільки добротністю резонатора. Для резонатора з добротністю $Q=676$, використаному в експерименті, кільватерне поле величиною 24 кВ/см, близьке до насичення, збуджується 1500 згустками.

- Продemonстровано прискорення згустків кільватерними полями без додаткового інжектора. Варіювання частоти слідування згустків f_{rep} шляхом зміни частоти задаючого генератора клістронного підсилювача викликає її відхилення від частоти збуджуваного кільватерного поля f_0 , що призводить до поділу згустків послідовності на драйверні, що збуджують кільватерне поле, та прискорювані в цьому полі. Експериментально у випадку відхилення частот ($\Delta f = f_{rep} - f_0 = 2,5$ МГц) за допомогою магнітного аналізатора отримано з первісної послідовності дві – одну з меншою енергією (-150 кеВ), втрачених на збудження кільватерного поля, та другу з більшою енергією (+150 кеВ), придбаних внаслідок прискорення в кільватерному полі.
- В концепції плазмового кільватерного прискорення досліджено створення плазми в резонаторі, заповненому нейтральним газом тиску від $5 \cdot 10^{-2}$ Тор до 760 Тор, самою послідовністю згустків. Плазма утворюється за рахунок ударної іонізації нейтралів електронами згустків, а при тиску біля 1 Тор в результаті розвитку пучково-плазмового розряду (ППР). Експериментально продемонстровано збудження кільватерних полів в плазмі, прискорення та фокусування в них електронних згустків.
- Варіюванням густини плазми створювалося відхилення плазмової частоти від частоти слідування згустків, що дозволило експериментально не тільки збудити плазмове кільватерне поле, але й прискорити в ньому згустки тієї ж послідовності, а дефокусування змінювати на фокусування.
- Реалізовано превалювання радіальної компоненти плазмового кільватерного поля над поздовжньою шляхом діафрагмування згустків на вході в плазмовий резонатор і зміни геометрії згустку – при сталій довжині згустку 1,7 см діаметр з 1 см зменшувався до 0,5 см, що дозволило вперше експериментально продемонструвати фокусування згустків плазмовим кільватерним полем.
- Розглянуто збудження в гібридній плазмово-діелектричній структурі як діелектричного кільватерного поля для прискорення, так і плазмового кільватерного поля для фокусування прискорюваних згустків. В експерименті плазма в прольотному каналі створювалась головною частиною послідовності згустків за рахунок іонізації нейтрального газу різного тиску. Для випадків хвилеводу і резонатора отримані кільватерні поля для прискорення в залежності від тиску газу і отже від густини плазми.

У випадку резонатора збуджуються значно більші кільватерні поля, однак в областях великої густини плазми збудження кільватерного поля пригнічується через відхилення частоти поля, збуджуваного в резонаторі на черенковському резонансі від частоти слідування згустків та екранування діелектричного поля у плазмі великої густини.

- Експериментально продемонстровано, що щільність плазми 10^{11} cm^{-3} в прольотному каналі гібридної плазмово-діелектричної структури забезпечує фокусування згустків по діаметру в 1,8 разів. Це виміряно здвоєними циліндрами Фарадея, які вимірюють периферійну та осьову частини струму пучка.

Практичне значення одержаних результатів. Результати наведених в дисертації експериментальних досліджень збудження когерентних кільватерних полів та прискорення в них електронних згустків можуть бути використані при розробці та побудові колайдерів наступного покоління для використання у вирішенні фундаментальних проблем фізики високих енергій, та створення компактних прискорювачів для промисловості, матеріалознавства, медицини, біології тощо.

Особистий внесок здобувача представлено в усіх опублікованих роботах [1-24] згідно з поставленими науковим керівником задачами, а саме: аналіз літературних даних; підготовка та проведення експериментів; проведення числових розрахунків; розробка, виготовлення, налаштування систем та вузлів і їх випробування; спільно з співавторами проведення аналізу отриманих результатів; підготовка результатів до друку, написання статей та тез доповідей на конференції за темою дисертації.

В роботах [5, 6, 10, 11, 14 18] здобувач приймав безпосередню участь в аналізі літератури, плануванні, постановці та проведенні експериментів по збудженню когерентних кільватерних полів у діелектричних структурах, обробці експериментальних результатів, підготовці матеріалів для публікацій та доповідей на конференціях.

В роботах [1-4, 15-17, 23] здобувач приймав безпосередню участь в аналізі літератури, плануванні та постановці експериментів, розробці експериментальної плазмової системи, в проведенні експериментів по збудженню когерентних кільватерних полів у плазмі, обробці експериментальних результатів та підготовці матеріалів для публікацій та доповідей на конференції.

В роботах [7-9 12, 13, 19-21] здобувач приймав безпосередню участь в аналізі літератури, плануванні та постановці експериментів, в проведенні експериментів з гібридними плазмово-діелектричних структурах, обробці експериментальних результатів та підготовці матеріалів для публікацій та доповідей на конференції.

В роботах [22, 24] приймав участь в аналізі літературних даних та підготовці матеріалів для оглядових публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені й отримали позитивний відгук на міжнародних та національних конференціях та школах: International Conference and School on Plasma Physic and Controlled Fusion, Alushta (Crimea), Ukraine, September 13-18, 2010 [15]; XI Международный семинар «Плазменная электроника и новые методы

ускорения», ХНУ им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина, 23-27 августа 2010 [16]; International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta (Crimea), Ukraine, September 17-22, 2012 [17]; XII International Workshop «Plasma electronics and new methods of acceleration», Karazin KNU, Kharkov, Ukraine, August 26-30, 2013 [18]; XIII International Conference «Plasma electronics and new methods of acceleration», Karazin KNU, Kharkov, Ukraine, August 24-28, 2015 [19,20]; International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Karazin KNU & NSC KIPT, Kharkiv, Ukraine, September 12–15, 2016 [21]; XXV International Workshop on Charged Particle Accelerators, NSC KIPT, Kharkiv, Ukraine, September 18-22, 2017 Ukraine, Kharkov [22].

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 14 статей в спеціалізованих фахових наукових виданнях України [1-14], що задовольняють вимогам ДАК МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертаційна робота і 2 статті у фахових науково-технічних журналах [23, 24], що додатково характеризують дисертацію. З них: 15 статей [1-13, 22, 23] включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 3 статті [5, 9, 13] опубліковано в спеціалізованих фахових наукових виданнях іноземних держав; 8 робіт в збірниках наукових праць, в матеріалах та тезах доповідей на наукових конференціях [15-22].

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів основного тексту з 71 рисунками та 2 таблицями, висновків та переліку використаних літературних джерел з 188 найменувань. Об'єм дисертації складає 154 сторінок, з них список використаних літературних джерел займає 21 сторінок, 4 сторінки займає додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, показано зв'язок даної роботи з науковими програмами, планами, темами, визначені мета і задачі роботи. Наведені основні наукові результати, показана їх наукова новизна й практичне значення. Вказаний особистий внесок автора, висвітлені апробація роботи, її зміст і структура.

Перший розділ є оглядом літературних даних з основних процесів, пов'язаних зі збудженням кільватерних полів у плазмі та діелектрику короткими лазерними імпульсами великої потужності, та короткими згустками релятивістських електронів. Наведено рекордні експериментальні дані з прискорення електронів у полях збуджених короткими лазерними імпульсами та полів збуджених електронними згустками. Розглянуто дані з теоретичних досліджень, проведених у ННЦ ХФТІ по збудженню кільватерних полів у гібридних плазмово-діелектричних структурах послідовністю згустків.

Основна частина матеріалів цього розділу була опублікована в [22, 24].

У другому розділі «Експериментальне обладнання для дослідження збудження кільватерних полів у діелектричній, плазмовій та плазмово-діелектричній структурах» розглянуто обладнання, що використовувалось для досягнення поставленої в дисертації мети. Всі експерименти з дослідження збудження кільватерних полів проводились з діелектричними, плазмовими та

гібридними плазмово-діелектричними структурами, які розміщувалися на виході лінійного резонансного прискорювача електронів «Алмаз-2М», що продукував послідовність релятивістських електронних згустків.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах [1-3, 5-8].

Третій розділ «Дослідження збудження кільватерних полів послідовністю релятивістських електронних згустків у діелектричній структурі» присвячений доказу когерентності кільватерних полів, збуджуваних окремими згустками послідовності в діелектричній структурі та прискорення згустків у збуджених полях. Мультибанчевий підхід полягає в тому, що інтенсивне кільватерне поле, збуджуване згустком з великим зарядом, може бути досягнуте довгою періодичною послідовністю згустків з невеликим зарядом, але з еквівалентним сумарним зарядом. Для доказу когерентного складання полів окремих згустків необхідно змінювати число згустків в послідовності. Через труднощі отримання послідовностей з різним числом згустків у проведених дослідженнях використані хвилеводи різної довжини. Можливість такої заміни впливає з того, що вихід збуджуваної хвилі з хвилеводу кінцевої довжини з груповою швидкістю v_g обмежує число згустків послідовності, що дають внесок у зростання сумарного кільватерного поля. Максимальне число згустків N_{max} , черенковські кільватерні поля яких при когерентному додаванні збільшують амплітуду повного черенковського поля, залежить від довжини хвилеводу L : $N_{max}=(L/\lambda)(v_0/v_g - 1)$, де λ - довжина хвилі збудженого поля, рівна відстані між згустками, v_0 - швидкість згустку. Змінюючи довжину діелектричного хвилеводу, можна змінювати число N_{max} . Зокрема, при $v_0/v_g=2$ в наших експериментах, для хвилеводу довжиною $L=\lambda$ реалізується режим одного згустку, а саме поля згустків у відрізку хвилеводу не перекриваються, так що огинаюча поля всієї послідовності має амплітуду кільватерного поля одного згустку. Змінюючи довжину діелектричного хвилеводу $L_d=\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$, можна спостерігати величину амплітуди кільватерного поля на виході діелектричного хвилеводу від 1-го, 2-х, 3-х ... згустків, відповідно.

В експериментах, проведених з неузгодженим хвилеводом через наявність відбиттів збуджуваного кільватерного поля, на залежності поздовжнього поля, лінійно зростаючій з довжиною хвилеводу (довжина змінювалась від 0 до 35 см з кроком 2,5 см), спостерігаються додаткові максимуми, резонансно зростаючі поблизу довжин хвилеводу, кратних половині довжини збуджуваної хвилі. Поліпшення узгодження хвилеводу за рахунок адіабатичних переходів, НВЧ-прозорі вакуумної заглушки відповідної товщини і поглиначів, які разом суттєво знижують відбиття збуджуваної хвилі, реалізовані на установці, схема якої приведена на Рис. 1.

Результатом такого узгодження стало зменшення резонансних осциляцій кільватерного поля на фоні в середньому лінійному зростанні його з довжиною хвилеводу (Рис. 2).

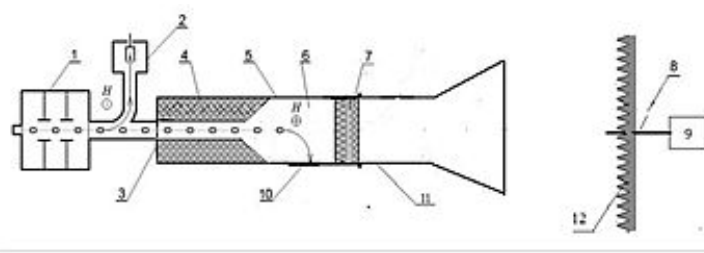


Рис. 1. Схема установки з урахуванням умов зменшення відбиття:
 1 - прискорювач «Алмаз-2М», 2 - магнітний аналізатор, 3 - діафрагма,
 4 - діелектрична структура з конусом, 5 - хвилевід, 6 - область поперечного
 магнітного поля, 7 - узгоджена діелектрична вакуумна заглушка, 8 - НВЧ зонд,
 9 - осцилограф, 10 - скляна пластина, 11 - додатковий хвилевід з рупором,
 12 - феритовий поглинач високочастотного випромінювання.

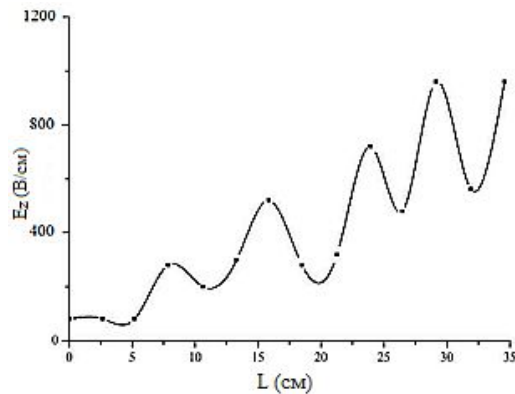


Рис. 2. Залежність амплітуди збуджуваного кільватерного поля від довжини узгодженої діелектричної структури.

Отримані в даних експериментах результати свідчать про когерентне додавання кільватерних полів окремих згустків, які перекриваються та інтерферують з ростом довжини хвилеводу.

Проведено експериментальні дослідження процесу збудження кільватерного поля в діелектричному резонаторі періодичною послідовністю електронних згустків-драйверів і процесу прискорення в цьому полі решти згустків-вітнесів цієї ж послідовності в умовах, коли частота слідування згустків f_{rep} не співпадає з частотою збуджуваної кільватерної хвилі f_0 . В експериментах частота кільватерної хвилі фіксована і визначалася черенковським резонансом (збігом швидкостей згустків з фазовою швидкістю збудженої хвилі). Частота проходження згустків варіювалася зміною частоти задаючого генератора клістронного підсилювача. У такій схемі "збудження-прискорення" з використанням однієї і тієї ж послідовності згустків відпадає необхідність у додатковому прискорювачі-інжекторі для отримання прискорюваних згустків, що спрощує експериментальну демонстрацію прискорення згустків в збуджуваних кільватерних полях.

Осцилограми огинаючих НВЧ сигналів кільватерного поля для відхилень частот: $\Delta f = f_{rep} - f_0 = 0$, $\Delta f = 1$ МГц і $\Delta f = 1,5$ МГц, (верхні) та струму пучка на циліндр Фарадея (нижні) показані на Рис. 3. Видно, що при наявності відхилення, по-перше, збудження кільватерного поля (зростання) змінюється його втратами (зменшення) на прискорення згустків, що змістились в прискорюючі фази. По-

друге, в середньому збудження дає меншу амплітуду кільватерного поля через зменшення кількості згустків, що збуджують.

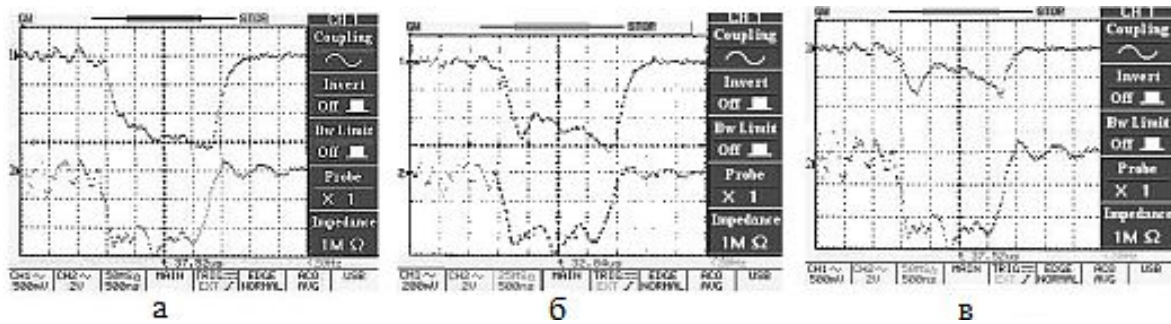


Рис. 3. Осцилограми огибающих НВЧ сигналов кильватерного поля для відхилень частот: $\Delta f = 0$ (а), $\Delta f = 1$ МГц (б), $\Delta f = 1,5$ МГц (с).

Вимірювання енергетичних спектрів електронів згустків до і після взаємодії зі структурою проводилися за допомогою магнітного аналізатора.

На Рис. 4 представлені отримані енергетичні спектри електронів пучка, що пройшли через резонатор без діелектрика (квадратики) і через резонатор з діелектричної вставкою (кружки) для різних відхилень частот.

Видно, що у резонансному випадку (Рис. 4а) в результаті взаємодії послідовності згустків з діелектричним резонатором енергетичний спектр, як ціле, змістився в область менших енергій, Це означає, що всі згустки втратили енергію на збудження кільватерного поля. При введенні відхилення частоти слідування згустків від частоти поля, що збуджується (Рис. 4б), початковий енергетичний спектр роздвоївся – одна частина згустків втратила енергію (до -150 кэВ) на збудження кільватерного поля, друга – прискорила (до +150 кэВ) в збудженому кільватерному полі.

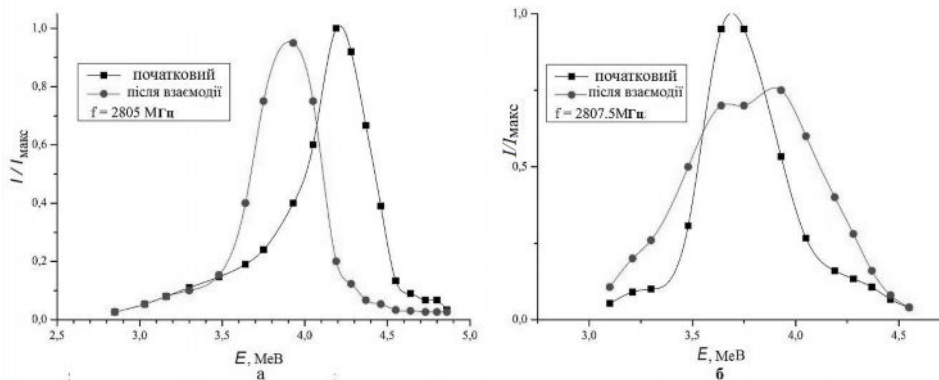


Рис. 4. Енергетичні спектри електронних згустків, що проходять через резонатор без діелектрика (квадратики) і через резонатор з діелектричною трубкою (кружки): а - $\Delta f = 0$; б - $\Delta f = 2.5$ МГц.

Матеріали цього розділу опубліковані в [5, 6, 10, 11, 14, 18].

Четвертий розділ «Дослідження збудження кільватерних полів послідовністю релятивістських електронних згустків у плазмі» присвячено опису експериментів зі збудження кільватерних полів у плазмі періодичною послідовністю релятивістських електронних згустків та фокусуванню згустків збудженими полями.

Для проведення цих експериментів була створена плазмова система, яка знаходилась на виході електронного прискорювача «Алмаз-2М» і являла собою хвилевід або резонатор, заповнений плазмою. Плазма створювалась самими електронними згустками першою частиною послідовності згустків на виході прискорювача. Схема експериментальної установки показана на Рис.5.

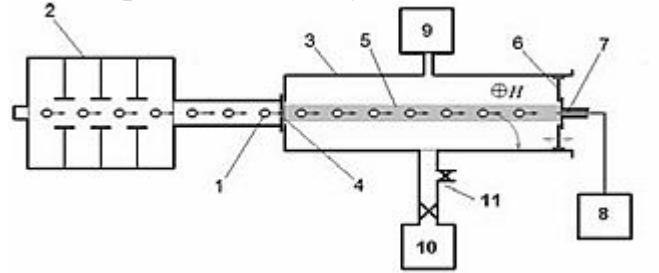


Рис. 5. Схема установки: 1 - прискорені електронні згустки; 2 - прискорювач; 3 - камера взаємодії; 4 - діафрагма; 5 - плазмовий канал; 6 - заглушка, що може рухатися у повздовжньому напрямку; 7 - НВЧ-зонд; 8 - НВЧ-зонд з осцилографом; 9 - вакуумний датчик; 10 - вакуумний насос; 11 - вентиль напуску повітря.

Пучок виходив з прискорювача через вихідну титанову фольгу, яка відділяла прискорювач з вакуумом $2 \cdot 10^{-6}$ Тор від камери взаємодії, де тиск нейтрального газу (повітря) можна було регулювати в діапазоні $10^{-3} \div 760$ Тор за допомогою вентиля натікання газу 11, і форвакуумним насосом 10.

На Рис.6 показана залежність амплітуди E_z -складової збуджуваного кільватерного поля від тиску нейтрального газу (крива 1) і струму пучка, виміряного циліндром Фарадея (крива 2) у випадку резонатора.

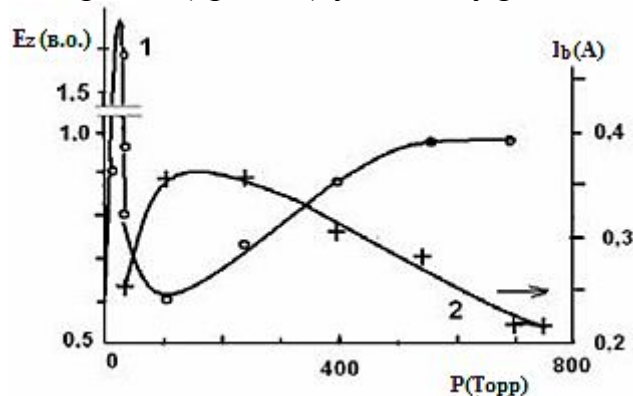


Рис. 6. Залежності амплітуди E_z -складової збудженого поля (крива 1) і величини струму пучка (крива 2) від тиску нейтрального газу.

Плазма утворюється за рахунок ударної іонізації нейтралів електронами згустків, а при тиску газу біля 1 Тор, для якого має місце збудження самого ефективного плазмового кільватерного поля, в результаті розвитку пучково-плазмового розряду (ППР). Суть ППР полягає в лавинній іонізації нейтралів електронами плазми, нагрітими збудженим згустками полем до енергії, більшої енергії іонізації нейтралів⁴.

⁴ Корнилов Е.А., Ковпик О.Ф., Файнберг Я.Б., Харченко И.Ф. Механизм образования плазмы при развитии пучковой неустойчивости. // ЖТФ. 1965. Т.35. В. 8. С. 1372-1377.

Густина отриманої плазми вимірювалась ВЧ-зондом Джонсена або відкритим бочкоподібним резонатором. ВЧ-зондом Джонсена вимірювався струм між двома пластинами, до яких прикладалася ВЧ-напруга на частоті 250 кГц. За відомими геометричними розмірами ВЧ-зонда, ВЧ-напруги і виміряного струму визначається провідність плазми σ . У нашому випадку провідність плазми визначається в основному рухливістю електронів $\sigma = en_e\mu_e$, що дозволяє при знайденому для умов експерименту з літературних даних значенню рухливості електронів μ_e та виміряній провідності σ знайти щільність плазми n_e . При тиску газу біля 1 Тор, при якому розвивається ППР-розряд, щільність плазми виявилась рівною $n_e = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Відкритим бочкоподібним резонатором щільність плазми визначалась по зсуву його резонансної частоти $f = 37245 \text{ МГц}$ при добротності $Q = 2 \cdot 10^4$. В умовах нашого експерименту щільність плазми, виміряна резонаторним методом, $n_e = 10^{15} (\Delta f/f) = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, що узгоджується з вимірами ВЧ-зондом.

З Рис.6 видно, що струм пучка на виході хвильоводу суттєво зменшується при тисках газу, коли утворюється плазма, що відбувається через кутовий розкид електронів в збуджених в плазмі кільватерних полях.

Одночасно з вимірюванням амплітуди збудженого поля НВЧ-зондом на торці хвильоводу також отримані енергетичні спектри електронів згустків. Для цього електронні згустки відхилялись на 90 градусів постійним поперечним магнітним полем на тонку бокову стінку металевого хвильоводу і потрапляли на скляну пластину. Відбитки електронних згустків на скляній пластині показані на Рис.7. Видно, що після взаємодії згустків з плазмовою структурою одна частина згустків втратила енергію на збудження кільватерного поля (мінімальна енергія стала 3.7MeV), а інша прискорила в цих полях (максимальна енергія сягає 5.2MeV).

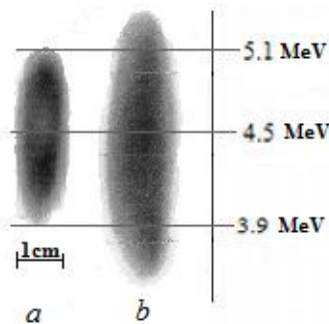


Рис. 7. Відбитки електронних згустків: а) на вході в хвильовід; б) після взаємодії з плазмовим хвильоводом.

Прискорення та фокусування електронів можна реалізувати, використовуючи згустки тільки однієї послідовності та відхилення між частотою слідування згустків f_{rep} та частотою збудженої плазмової хвилі f_p . Однак, у випадку чисто плазмової структури фіксованою залишається частота слідування згустків f_{rep} , а відхилення частот створюється зміною плазмової частоти f_p , тобто варіацією струму пучка або тиску газу.

Дослідження процесу фокусування електронних згустків поперечною складовою збуджуваного плазмового кільватерного поля проводилися при тиску нейтрального газу 760 Тор для двох випадків: струм пучка $I_b = 0,5 \text{ А}$, а діаметр

згустку і його довжина порівнянні ($d=10$ мм, $l=17$ мм), та при струмі $I_b=0,25$ А, коли діаметр згустків був значно менше його довжини ($d=4$ мм, $l=17$ мм). Другий випадок реалізовувався шляхом діафрагмування пучка і забезпечував збудження кільватерного поля з переважаючою радіальною складовою. Крім того, зменшення струму в другому випадку приводило до виникнення відхилення $\Delta f = f_{rep} - f_p \neq 0$. Відхилення призводить до зміщення згустків по фазі, в результаті якого частина згустків послідовності може зміститися з дефокусуєчої фази в фокусуєчу і навпаки.

У першому випадку створена плазма виявляється резонансною ($f_{rep} = f_p$), так що всі згустки знаходяться в гальмівній фазі поздовжньої складової збудженого поля і фазах радіальної складової поля, в яких одна частина кожного згустку фокусується, а друга дефокусується. Це демонструється на Рис. 8, на якому представлені відбитки згустків на скляних пластинах. Для наглядності зроблена радіальна градація за потемнінням скла. Систематичне зростання поперечного розміру згустків з відстанню зумовлене наявним кутовим розкидом електронів згустків, що виникає на вихідній фользі прискорювача та при їх зіткненні з нейтралами.

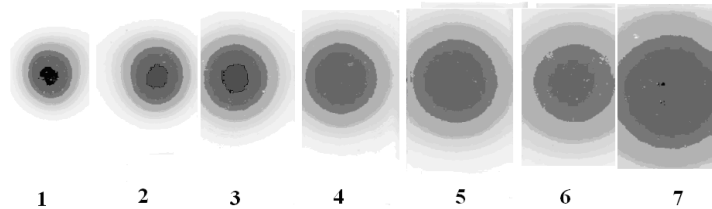


Рис. 8. Діаметри пучка на різних відстанях від вихідної фольги прискорювача для $I_b=0,5$ А: 1 – 0 см, 2 – 5 см, 3 – 7 см, 4 – 9 см, 5 – 11 см, 6 – 13 см, 7 – 15 см.

У другому випадку зі зменшеним струмом і меншим діаметром згустку виміряна поздовжня компонента плазмового кільватерного поля зростає без насичення на протязі всієї послідовності згустків з декількома биттями (див. Рис. 9).

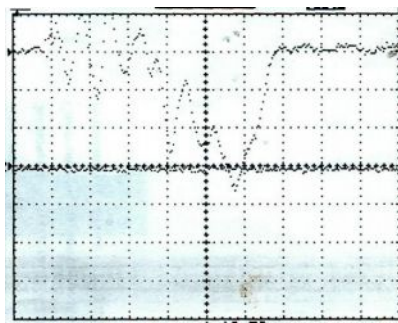


Рис. 9. Осцилограма E_z складової кільватерного поля для $I_b=0,25$ А.

Це зумовлено взаємодією нерезонансної послідовності згустків з плазмою ($f_{rep} \neq f_p$)⁵, при якій завдяки двовимірній радіально-поздовжній динаміці згустки,

⁵ Lotov K.V., Maslov V.I., Onishchenko I.N. and Svistun E.N. Resonant excitation of plasma wakefields by a non-resonant train of short electron bunches. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2010. V.52. P. 065009-1-065009-7.

що не збуджують кільватерне поле, а навпаки поглинають його енергію, дефокусуються і виходять із взаємодії, так що кільватерне поле продовжує зростати завдяки його збудженню недефокусованими згустками.

При вимірах діаметру пучка за відбитками на склі (Рис. 101) спостерігається зміна фокусуєної дії поперечної складової збудженого поля на дефокусуєну і навпаки.

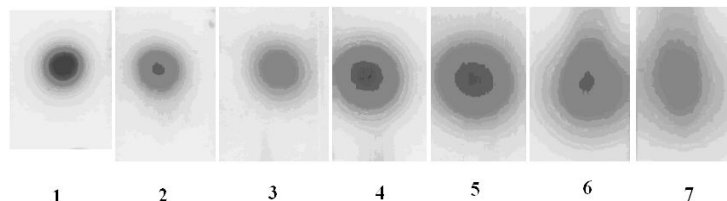


Рис. 10. Діаметри пучка на різних відстанях від вихідної фольги прискорювача для $I_b = 0,25$ А: 1 – 0 см, 2 – 5 см, 3 – 7 см, 4 – 9 см, 5 – 11 см, 6 – 13 см, 7 – 15 см.

Матеріали цього розділу опубліковані в [1-4, 15-17, 23].

П'ятий розділ «Дослідження збудження кільватерних полів послідовністю релятивістських електронних згустків у гібридних плазмово-діелектричних структурах» представляє результати досліджень плазмово-діелектричної структури, в якій на черенковському резонансі збуджуються діелектричне кільватерне поле для прискорення та плазмове кільватерне поле для фокусування згустків.

Дослідження збудження кільватерного поля в плазмово-діелектричній структурі проводилися на установці, схема якої приведена на Рис. 11.

Плазма в каналі діелектричної структури отримувалась іонізацією нейтрального газу відповідного тиску безпосередньо послідовністю електронних згустків, що збуджують кільватерне поле (див. попередній розділ).

Для реалізації хвилеводного режиму необхідно уникнути відбиття збуджуваної хвилі. З цією метою діелектрична вставка закінчувалася діелектричним конусом, а на фторопластовій вакуумній заглибці розміщувався феритовий поглинач.

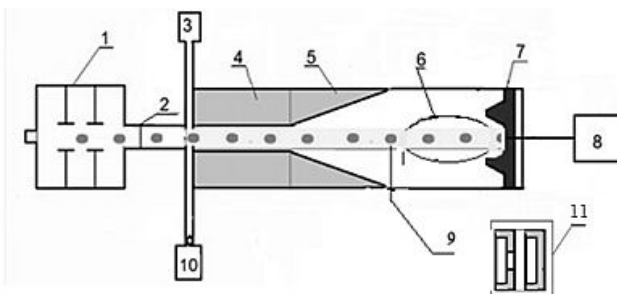


Рис. 11. Експериментальна установка: 1 - прискорювач «Алмаз-2М»; 2 - титанова фольга; 3 - вентиль натікання газу; 4 – кругла діелектрична структура; 5 - узгоджувальний конус; 6 - відкритий бочкоподібний резонатор (OBR); 7 - феритовий мікрохвильовий поглинач; 8 - осцилограф; 9 - ВЧ зонд Джонсена; 10 - форвакуумний насос; 11 - подвійний циліндр Фарадея.

Залежність амплітуди збуджуваного поздовжнього кільватерного поля на осі для всього діапазону тисків газу у хвилеводному випадку і в режимі одиночного згустку приведена на Рис. 12 (нижня крива). В області тисків поблизу 1.0 Торр,

при яких розвивається ППР і створюється плазма, у випадку діелектричного хвилеводу діелектричне кільватерне поле в каналі стає об'ємним, що збільшує коефіцієнт зв'язку згустку з цим полем і призводить до його зростання в порівнянні з випадком відсутності напуску газу (Рис. 12, горизонтальна лінія внизу).

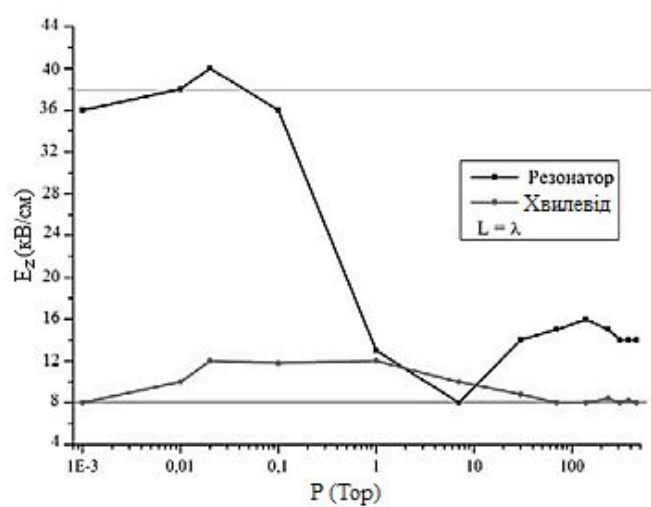


Рис. 12. Залежність E_z складової збуджуваного поля від тиску нейтрального газу в діелектричній структурі

У разі діелектричного резонатора (прибиралися узгоджувальні елементи і встановлювалася металева заглушка на виході у вигляді плунжера) в умовах подвійного резонансу $f_{rep}=f_0=f_n$ (збіги черенковської частоти f_0 з частотою слідування згустків f_{rep} і одночасно з власною частотою резонатора f_n) амплітуда кільватерного поля істотно зростає. Це викликано тим, що число згустків, які дають внесок в сумарне кільватерне поле обмежується добротністю Q і становить для реальних Q сотні згустків, тоді як у хвилеводному випадку таке число згустків визначається довжиною хвилеводу і груповою швидкістю і не перевищує десятків.

Наявність плазми в області тисків, при яких розвивається ППР, призводить до відхилення обох резонансів і до зменшення амплітуди кільватерного поля (Рис. 12, верхня крива) в порівнянні з випадком відсутності напуску газу, тобто без плазми (Рис. 12 горизонтальна лінія вгорі).

Для дослідження фокусування згустків релятивістських електронів використовувався подвійний циліндр Фарадея (див. (11) на Рис. 11), яким наявність фокусування визначалася по збільшенню струму на другий циліндр і одночасному зменшенню струму на перший циліндр. На Рис. 13 показані осцилограми струму пучка, отримані при тиску нейтрального газу в прольотному каналі діелектричного хвилеводу при $P=10^{-3}$ Тор і $P=0,5$ Тор. В першому випадку плазма не виникає, а в другому, завдяки розвитку ППР, щільність створеної плазми $n_e=10^{11}\text{см}^{-3}$. Збільшення струму пучка в другому циліндрі та його зменшення в першому циліндрі в разі присутності плазми (див. Рис. 13, б) свідчить про фокусування електронних згустків. В наближенні однорідного розподілу струму пучка по радіусу розрахунки показують, що діаметр пучка в експерименті з плазмою зменшується в 1,8 разів.

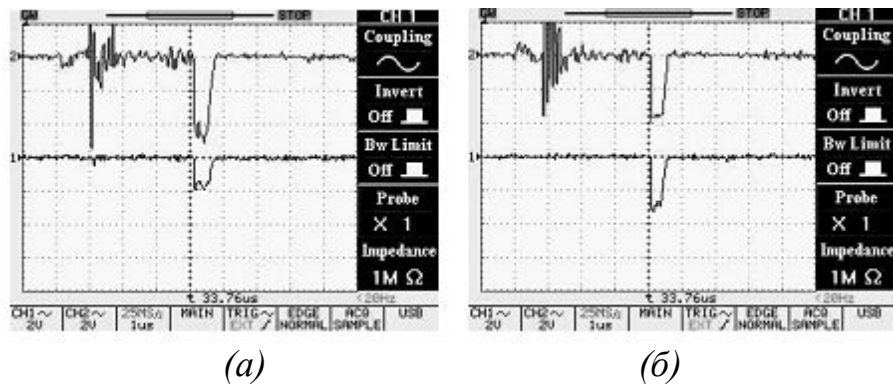


Рис.13. Осцилограми струму пучка на подвійний циліндр Фарадея (верхня крива відповідає першому циліндру, а нижня – другому) при $P = 10^{-3}$ Тор (а) і 0,5 Тор (б).

Матеріали цього розділу опубліковані в [7-9, 12, 13, 19-21].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримані результати, важливі для розробки нового методу високоградієнтного прискорення заряджених частинок – прискорення кільватерними полями. В роботі експериментально показано, що при збудженні кільватерних полів періодичною послідовністю релятивістських згустків у діелектричних, плазмових та гібридних плазмово-діелектричних структурах когерентність кільватерних полів окремих згустків дозволяє збуджувати сумарне кільватерне поле за величиною таке ж, як і кільватерне поле одного згустку з еквівалентним сумарним зарядом. В роботі також експериментально продемонстроване кільватерне прискорення згустків у збуджених кільватерних полях та фокусування згустків при використанні плазмового кільватерного поля.

1. У проведених дослідженнях з діелектричними структурами доведено експериментально, що кільватерні поля, збуджувані в прискорюючих структурах на черенковському резонансі окремими згустками регулярної послідовності з однаковою частотою та кратною 2π початковою фазою за умови співпадіння частоти слідування згустків з частотою збуджуваного поля, є когерентними. Експериментальним доказом їх когерентності є вимірювання сумарного кільватерного поля всієї послідовності на виході відрізка хвильоводу різної довжини. Так як збуджене згустком поле залишає хвильовод з груповою швидкістю v_g , то кількість згустків послідовності, кільватерні поля яких додаються, залежить від довжини хвильоводу. Змінюючи довжину хвильоводу, отримано величину сумарного кільватерного поля 1-го, 2-х, 3-х і т.д. згустків, величина якого пропорційно зростає з довжиною, а отже з числом згустків, що свідчить про когерентність кільватерних полів окремих згустків.

2. За допомогою НВЧ-осцилографа з пропускною здатністю 15 ГГц отримано безпосередню реалізацію сигналу 3 ГГц кільватерного поля в режимах 1-го, 2-х, 3-х і т.д. згустків. Пропорційним зростанням кільватерного поля з числом згустків підтверджено їх когерентність.

3. Показано, що на відміну від хвильоводу, в якому кількість згустків, кільватерні поля яких дають вклад в сумарне поле, обмежується довжиною хвильоводу, в резонаторі збуджені поля не полишають резонатор і при співпадінні частоти поля з власними частотами резонатора кількість згустків, які дають вклад

в сумарне поле, обмежується тільки добротністю резонатора. Для резонатора з добротністю $Q=676$, використаному в експерименті, кільватерне поле величиною 24 кВ/см, близьке до насичення, збуджується 1500 згустками.

4. Експериментально продемонстроване прискорення частини згустків тієї ж послідовності, яка збуджує кільватерне поле. Для цього варіюванням частоти слідування згустків f_{rep} шляхом зміни частоти задаючого генератора клістронного підсилювача створюється її відхилення від частоти збуджуваного кільватерного поля f_0 , що призводить до поділу згустків послідовності на драйверні, що збуджують кільватерне поле, та прискорювані в цьому полі. Експериментально у випадку відхилення частот ($\Delta f = f_{rep} - f_0 = 2,5$ МГц) за допомогою магнітного аналізатора отримано з початкового одного моноенетичного пучка два пучка – один з меншою енергією, що втратив енергію (-150 кеВ) на збудження кільватерного поля, та другий з більшою, що одержав енергію (+150 кеВ) внаслідок прискорення у кільватерному полі.

5. У концепції плазмового кільватерного прискорення досліджено створення плазми в резонаторі, заповненому нейтральним газом тиску від $5 \cdot 10^{-2}$ Тор до 760 Тор, самою послідовністю згустків. Плазма утворюється за рахунок ударної іонізації нейтралів електронами згустків, а при тиску біля 1 Тор в результаті розвитку релятивістського пучково-плазмового розряду. Експериментально продемонстровано збудження кільватерних полів в плазмі, прискорення та фокусування в них електронних згустків.

6. Діафрагмуванням згустків на вході в плазмовий резонатор змінювалась геометрія згустку – при сталій довжині згустку 1,7 см діаметр з 1 см зменшувався до 0.5 см, що забезпечувало превалювання радіальної компоненти плазмового кільватерного поля над поздовжньою. Це дозволило експериментально продемонструвати фокусування згустків плазмовим кільватерним полем.

7. У гібридній плазмово-діелектричній структурі відбувається збудження як діелектричного кільватерного поля для прискорення, так і плазмового кільватерного поля для фокусування прискорюваних згустків. В експерименті плазма в прольотному каналі створювалась першою частиною послідовності згустків за рахунок іонізації нейтрального газу різного тиску. Для випадків хвилеводу і резонатора отримані кільватерні поля, що прискорюють, в залежності від тиску газу і, відповідно, від щільності плазми. У випадку резонатора збуджуються значно більші кільватерні поля, однак в областях великої щільності плазми збудження кільватерного поля пригнічується через відхилення частоти поля, збуджуваного в резонаторі на черенковському резонансі від частоти слідування згустків, а також через екранування діелектричного поля в щільній плазмі.

8. Густина плазми 10^{11} см⁻³ в прольотному каналі гібридної плазмово-діелектричної структури забезпечує фокусування згустків по діаметру в 1.8 разів, що фіксується експериментально здвоєними циліндрами Фарадея, які вимірюють периферійну та осьову частини струму пучка.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Киселёв В.А., Линник А.Ф., Онищенко И.Н., Приступа В.И. Фокусировка релятивистских электронных сгустков при возбуждении кильватерного поля в плазме // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (7). 2010. №4(68). С. 78-81.
2. Kiselev V.A., Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I. Wakefields excitation in plasma, produced by a sequence of electron bunches in neutral gas, accelerating and focusing electrons by them // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics (17). 2011. № 1 (71). P. 77-79.
3. Kiselev V.A., Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I. Acceleration and focusing of electron bunches by wakefields in plasma produced in neutral gas by a nonresonant sequence of bunches // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics (18) 2012. № 6(82). P. 155-157.
4. Kiselev V.A., Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., Ivanov B.I., Prishchepov V.P. Measurement of plasma density formed at passing of a sequence of relativistic electron bunches through the neutral gas // Вопросы атомной науки и техники, Серия: Физика плазмы (19). 2013. №1(83). P. 143-145.
5. Kiselev V.A., Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I. Determination of the energy of a relativistic electron beam by measuring the thickness of the colored layer in glass // Instruments and Experimental Techniques, 2012, V. 55, № 3, P. 347-350.
6. Березина Г.П., Егоров А.М., Кривоносов Г.А., Линник А.Ф., Омелаенко О.Л., Онищенко И.Н., Приступа В.И., Ус В.С. Ускорение электронных сгустков при введении расстройки между частотой следования сгустков и частотой возбуждаемого ими в диэлектрической структуре кильватерного поля // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования (65). 2015. № 6(100), С. 56-59.
7. Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., Berezina G.P., Omelayenko O.L., Us V.S. Plasma production by a sequence of relativistic electron bunches in the transit channel of the dielectric structure // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration (9). 2015. № 4(98). P. 117-119.
8. Kiselev V.A., Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., Sotnikov G.V., Berezina G.P. Wakefield excitation in plasma-dielectric structures by a sequence relativistic electron bunches. // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics (21). 2015. № 1(95). P. 137-140.
9. Berezina G.P., Galaydych K.V., Knyazev R.R., Linnik A.F., Markov P.I., Omelayenko O.L., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., Sotnikov G.V., Us V.S. Concept of plasma-dielectric wakefield accelerator. Theory and experiment. // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration (9). 2015. № 4(98). P. 97-104.
10. Onishchenko I.N., Kiselev V.A., Linnik A.F., Pristupa V.I., Sotnikov G.V. Investigations of the concept of a multibunch dielectric wakefield accelerator // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2016. V.829. P. 199-205.

11. Березина Г.П., Егоров А.М., Кривоносов Г.А., Линник А.Ф., Омелаенко О.Л., Онищенко И.Н., Приступа В.И., Ус В.С. Исследование мультибанчевой схемы возбуждения кильватерных полей // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования (66). 2016. №3(103). С. 66-68.
12. Berezina G.P., Galaydych K.V., Kniaziev R.R., Linnik A.F., Markov P.I., Omelaenko O.L., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., Sotnikov G.V., Tolstoluzhsky A.P., Us V.S. Multibunch regime of wakefield excitation in a plasma-dielectric structure // Ukr. J. Phys. 2016. V. 61, № 8. P. 690-701.
13. Onishchenko I.N., Berezina G.P., Galaydych K.V., Kniaziev R.R., Linnik A.F., Markov P.I., Omelaenko O.L., Pristupa V.I., Sotnikov G.V., Us V.S. // Elaboration of plasma-dielectric wakefield accelerator. // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics (22). 2016. № 6(106). P.133-139.
14. Linnik A. F., Onishchenko I. N., and Pristupa V. I.. An experimental study of the electron acceleration with detuning of the bunch repetition frequency from that of an excited wake field // Technical Physics Letters. 2017. V. 43, № 2. P. 183-185.
15. Kiselev V.A., Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I. Wakefields excitation in plasma, formed by a sequence of electron bunches in neutral gas, accelerating and focusing electrons by them // International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion and 4-th Alushta International Workshop on the Role of Electric Fields in Plasma Confinement in Stellarators and Tokamaks, September, 13-18, 2010 : Book of Abstracts / Alushta (Crimea), Ukraine 2010, P. 121.
16. Киселев В.А., Линник А.Ф., Онищенко И.Н., Приступа В.И. Фокусировка релятивистских электронных сгустков при возбуждении кильватерного поля в плазме // XI Международный семинар «Плазменная электроника и новые методы ускорения», 23-27 августа 2010 г.: Программа семинара / ХНУ им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина, 2010. С. 8.
17. Kiselev V.A., Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., Ivanov B.I., Prishchepov V.P. Measurements of plasma density produced at passage of a sequence of relativistic electron bunches through the neutral gas // International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop «Nano- and micro-sized structures in plasmas». September, 17-22, 2012.: Book of Abstracts, / Alushta (Crimea), Ukraine, 2012 P. 139.
18. Kiselev V.A., Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I. To the possibility of liquid dielectrics use in wakefield method of charged particle acceleration // XII International Workshop «Plasma electronics and new methods of acceleration» August, 26-30, 2013: Program / Karazin KNU, Kharkov, Ukraine, 2013, P. 44.
19. Berezina G.P., Galaydych K.V., Knyazev R.R., Linnik A.F., Markov P.I., Omelayenko O.L., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., Sotnikov G.V., Us V.S. Concept of plasma-dielectric wakefield accelerator. Theory and experiment // XIII International Conference «Plasma electronics and new methods of acceleration» August, 24-28, 2015: Program / Karazin KNU. Kharkov, Ukraine, 2015, P. 8.
20. Linnik A.F., Onishchenko I.N., Pristupa V.I., Berezina G.P., Omelayenko O.L., Us V.S. Plasma production by a sequence of relativistic electron bunches in the transit channel of the dielectric structure // XIII International Conference

«Plasma electronics and new methods of acceleration», August, 24-28, , 2015: Program / Karazin KNU, Kharkov, Ukraine, 2015, P. 8.

21. Onishchenko I.N., Berezina G.P., Galaydych K.V., Kniazev R.R., Linnik A.F., Markov P.I., Omelaenko O.L., Pristupa V.I., Sotnikov G.V., Us V.S. Elaboration of plasma-dielectric wakefield accelerator // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion. September, 12–15, 2016: Book of Abstracts, / Karazin KNU, Kharkiv, Ukraine, 2016, P. 96.

22. Onishchenko I.N., Pristupa V.I. Wakefield acceleration. State and Prospects (Overview) // XXV International Workshop on Charged Particle Accelerators. September, 18-22, 2017: Program / NSC KIPT, Kharkiv, Ukraine, 2017: P. 1.

23. Киселёв В.А., Линник А.Ф., Онищенко И.Н., Приступа В.И. Возбуждение кильватерных полей последовательностью сгустков релятивистских электронов в плазме, образуемой при их прохождении через нейтральный газ различного давления // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (7). 2010. № 4 (68). С.75-77.

24. Onishchenko I.N., Pristupa V.I. Wakefield acceleration. State and Prospects (Overview) // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (67). 2017. V. 6(112). P. 34-39.

АНОТАЦІЯ

Приступа В.І. «Збудження когерентних кильватерних полів в діелектричних, плазмових та плазмово-діелектричних мультибанчевих кильватерних прискорювачах», – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико–математичних наук зі спеціальності 01.04.20. – Фізика пучків заряджених частинок. – Національний науковий центр «Харківський фізико–технічний інститут». – Харків, 2017.

Викладено результати експериментальних досліджень когерентності кильватерних полів, збуджених регулярною послідовністю релятивістських електронних згустків у діелектричних, плазмових та гібридних плазмово-діелектричних структурах. Для відрізка хвилеводу збуджене згустком поле залишає хвилевід, так що кількість згустків послідовності, кильватерні поля яких додаються, визначається довжиною хвилеводу. Експериментальним доказом когерентності збуджених полів є лінійне зростання сумарного кильватерного поля з числом згустків, а отже з довжиною хвилеводу. Варіюванням щільності плазми створюється відхилення плазмової частоти від частоти слідування згустків, що дозволило експериментально не тільки збудити плазмове кильватерне поле, але й прискорити в ньому згустки тієї ж послідовності. В діелектричній структурі подібне відхилення досягалося варіюванням частоти слідування згустків шляхом зміни частоти задаючого генератора клістронного підсилювача. В гібридній плазмово-діелектричній структурі було збуджене як діелектричне кильватерне поля для прискорення, так і плазмове кильватерне поле для фокусування прискорюваних згустків. Щільність плазми 10^{11}см^{-3} в прольотному каналі гібридної плазмово-діелектричної структури привело до фокусування згустків по

діаметру в 1,8 разів, що фіксувалось експериментально здвоєними циліндрами Фарадея, які вимірюють периферійну та осьову частини струму пучка.

Ключові слова: діелектрик, плазма, згустки, кильватерні поля, прискорення, фокусування.

ABSTRACT

Pristupa V.I. "Excitation of coherent wakefields in dielectric, plasma and plasma-dielectric multibunch wakefield accelerators". – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences by speciality 01.04.20. – Physics of charged particle beams. – National Science Center «Kharkiv institute of physics and technology», Kharkiv, 2017.

The results of experimental investigations of the coherence of wakefields excited by a regular sequence of short relativistic electron bunches in dielectric, plasma and hybrid plasma-dielectric structures are presented. For a waveguide segment, the excited field leaves the waveguide, so that the number of bunches of the sequence, whose wakefields are added, is determined by the length of the waveguide. An experimental proof of the coherence of the excited fields is the linear growth of the total wakefield with the number of bunches of the sequence. By varying the plasma density, detuning of plasma frequency and bunch repetition frequency was created, that allowed not only to excite plasma wakefield, but also to accelerate bunches of the same sequence. In a dielectric structure the similar detuning was achieved by varying the bunch repetition frequency if changing the master oscillator frequency of the klystron amplifier. In the hybrid plasma-dielectric structure, both the dielectric wakefield for acceleration and the plasma wakefield for focusing were excited. Plasma density 10^{11}cm^{-3} in the transit channel of the hybrid plasma-dielectric structure provides focusing of bunches by diameter in 1.8 times, which was fixed experimentally by dual Faraday cylinders, which measured the peripheral and axial parts of the beam current.

Keywords: dielectric, plasma, electron bunches, wakefields, acceleration, focusing.

АННОТАЦИЯ

Приступа В.И. «Возбуждение когерентных кильватерных полей в диэлектрических, плазменных и плазменно-диэлектрических мультибанчевых кильватерных ускорителях», - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20. - Физика пучков заряженных частиц. - Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт». - Харьков, 2017

Изложены результаты экспериментальных исследований когерентности кильватерных полей, возбужденных регулярной последовательностью коротких релятивистских электронных сгустков в диэлектрических, плазменных и гибридных плазменно-диэлектрических структурах. Экспериментальным доказательством когерентности возбужденных полей является линейный рост суммарного кильватерного поля с числом сгустков последовательности. В случае отрезка волновода возбужденное сгустком поле покидает волновод с групповой скоростью, так что количество сгустков последовательности, кильватерные поля

которых складываются, определяется длиной волновода. Это дает возможность для длинной последовательности получить величины кильватерного поля для соответствующих длин волновода такие же, как и для последовательностей с 1-го, 2-х и т.д. сгустков. Полученный в эксперименте с диэлектрической структурой линейный рост суммарного поля с длиной волновода свидетельствует о когерентности кильватерных полей отдельных сгустков. Для плазменного резонатора с резонансной плазмой (плазменная частота 3ГГц совпадает с частотой следования сгустков) возбужденное кильватерное поле было в 5 раз больше, чем для плазменного волновода. Диафрагмированием сгустков на входе в плазменный резонатор их диаметр уменьшался с 1см до 0,5см, что обеспечивало преобладание радиальной компоненты плазменного кильватерного поля над продольной и, таким образом, способствовало более выраженной фокусировке/дефокусировке как драйверных, так и ускоряемых сгустков. Варьированием плотности плазмы создается расстройка плазменной частоты с частотой следования сгустков, что позволило экспериментально не только возбудить плазменное кильватерное поле, но и ускорить в нем сгустки той же последовательности. В случае диэлектрической структуры расстройка частот, благодаря которой достигается ускорение сгустков возбужденным кильватерным полем с использованием одной и той же последовательности без дополнительного инжектора, достигается варьированием частоты следования сгустков путем изменения частоты задающего генератора клистронного усилителя. Экспериментально в случае расстройки частот 2,5МГц получено из первоначальной одной последовательности две - одну с меньшей энергией (-150кеВ, потерянных на возбуждение кильватерного поля), и вторую с большей энергией (+150кеВ, приобретенных в результате ускорения в кильватерном поле). В гибридной плазменно-диэлектрической структуре происходит возбуждение как диэлектрического кильватерного поля для ускорения, так и плазменного кильватерного поля для фокусировки ускоряемых сгустков. Однако в областях большой плотности плазмы возбуждение диэлектрического кильватерного поля подавляется из-за расстройки частоты поля, возбуждаемого в резонаторе на Черенковский резонансе, с частотой следования сгустков и экранирование диэлектрического поля в плотной плазме. Наличие плазмы в пролетном канале гибридной плазменно-диэлектрической структуры обеспечивает фокусировку сгустков по диаметру в 1.8 раз, что фиксируется экспериментально сдвоенными цилиндрами Фарадея, которые измеряют периферийную и осевую части тока пучка.

Ключевые слова: диэлектрик, плазма, электронные сгустки, кильватерные поля, ускорение, фокусировка.