

Відгук

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Князева Романа Романовича

«Прискорення заряджених частинок кільватерними полями в плазмово-діелектричних структурах», яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми

Дисертаційну роботу Князева Р.Р. присвячено проблемі прискорення заряджених частинок кільватерними полями. Ця проблема є **актуальною** та важливою для світового фізичного співтовариства. Прискорювачі заряджених частинок представляють собою пристрої для отримання пучків заряджених частинок з енергіями від десятків кеВ до декількох ТеВ. Ці пристрої знаходять використання у сучасних медицині, технологіях та науці. Зокрема, прискорення частинок до високих енергій є необхідним для науковців, які вивчають речовину, енергію, простір та час. Але сучасні пристрої заряджених частинок, як правило, мають великі розміри, тому їх будівництво та утримання в працездатному стані є дуже коштовним. Тому, актуальним є розробка альтернативних малогабаритних прискорювачів частинок. Одним із альтернативних методів прискорення частинок до високих енергій є метод, що базується на їх прискоренні в плазмі кільватерними полями.

Роботи по прискоренню заряджених частинок кільватерними полями ведуться в багатьох провідних наукових центрах на протязі багатьох десятиріч. Кільватерні поля можуть збуджуватися одиничним згустком заряджених частинок, послідовністю згустків заряджених частинок або лазерним імпульсом. Ідея використання для прискорення частинок полів, що збуджуються згустком заряджених частинок в плазмі, була запропонована давно. Попередніми авторами були проведені дослідження з прискорення заряджених частинок в діелектричних резонаторах за відсутності плазми кільватерними полями, що збуджуються послідовністю електронних згустків. Прискорення частинок кільватерними полями в плазмово-діелектричних структурах вивчалось у випадку присутності зовнішнього магнітного поля, яке сприяло фокусуванню пучка. Але якщо використовуються релятивістські пучки, які є доволі стабільними за транспортування в хвилеводі, то присутність зовнішнього магнітного поля є необов'язковою. Саме цей випадок розглядається в дисертаційній роботі Князева Романа Романовича.

Використання плазмово-діелектричної кільватерної структури повинно дозволити отримувати високі темпи прискорення згустків заряджених частинок, які є характерними для суто діелектричних кільватерних систем, з їх одночасним радіальним фокусуванням. Фокусування зумовлено присутністю плазми в прольотному каналі діелектричної структури. Змінюючи параметри діелектричної структури та густину плазми, можна впливати на прискорення та фокусування пучка.

Дисертаційну роботу виконано в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна та ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» відповідно

з 3 науково-дослідними темами. Вона складається зі вступу, шести розділів, в першому з яких наведено огляд літератури за темою дослідження, висновків та переліку використаних літературних джерел.

У розділі 2 представлено лінійну теорію збудження кільватерних полів одиночним згустком у плазмово-діелектричному хвилеводі. Отримано аналітичні вирази для кільватерного поля згустку, що має форму нескінченно тонкого кільця та кінцеві розміри. Розраховано сили, які діють на тестову частинку. Показано, що поява сили, яка фокусує згусток заряджених частинок, пов'язана зі збудженням плазмової хвилі, а ефективне прискорення згустку може бути досягнуто завдяки збудженню власних мод діелектричного хвилеводу.

У розділі 3 вдосконалено аналітичну модель, що представлено у попередньому розділі, за рахунок врахування власних квазістатичних полів згустку. Представлено аналітичні вирази, що описують кільватерні поля, які збуджуються в плазмово-діелектричній структурі згустком заряджених частинок, з урахуванням власного поля згустку. Проаналізовано вплив власного квазістатичного поля згустку на радіальну динаміку частинок згустку залежно від енергії згустку.

У розділі 4 наведено результати числового моделювання процесу збудження кільватерних полів у плазмово-діелектричному хвилеводі. Розглянуто лінійний та сильно нелінійний (blowout) режими збудження структури. Представлено повздовжні профілі поперечної та повздовжньої сили, що діють на тестову частинку, які було розраховано з використанням метода частинка-в-комірці. Показано, що результати числових розрахунків якісно узгоджуються з результатами, отриманими автором на базі аналітичного підходу. Встановлено, що на фокусування згустку частинок в blowout-режимі впливає не тільки співвідношення між густинами згустку та плазми, а й вихідна кількість електронів плазми.

У розділі 5 розглянуто збудження кільватерних полів в плазмово-діелектричній структурі серією згустків. Проаналізовано залежність амплітуди кільватерного поля від густини плазми, що заповнює пролітний канал діелектричної структури. Показано можливість тонкого налаштування системи за допомогою зміни ширини діелектричної вставки. Запропоновано найбільш оптимальний варіант налаштування системи.

У розділі 6 наведено результати числового моделювання динаміки прискорюваного згустку в плазмово-діелектричному хвилеводі. Вивчено вплив початкового емітансу прискорюваного згустку на його фокусування. Представлено модель принципово нового методу транспортування згустків заряджених частинок у діелектричних хвилеведучих структурах за допомогою плазмових комірок, які розділені вакуумними проміжками. Наведено результати числового моделювання, що описують поведінку прискорюваного згустку в цій структурі.

У висновках стисло викладено результати дисертаційного дослідження за темою «Прискорення заряджених частинок кільватерними полями в плазмово-діелектричних структурах».

До нових наукових результатів слід віднести:

1. Побудовано лінійну теорію збудження кільватерних полів у гібридних плазмово-діелектричних прискорювальних структурах для ізотропної плазми. Виявлено і досліджено можливість отримання і налаштування таких повздовжніх положень тестового згустку щодо ведучого згустку, при яких можна забезпечити прискорення згустку заряджених частинок, що супроводжуватиметься їх одночасним радіальним фокусуванням.
2. Досліджено вплив власного кулонівського поля згустку на поперечну динаміку частинок прискорюваного пучка у плазмово-діелектричній структурі. Вивчено можливість збільшення амплітуди кільватерного поля у плазмово-діелектричному кільватерному прискорювачі за допомогою настроювання власної частоти та частоти інжектування згустків за допомогою зміни внутрішнього або зовнішнього діаметрів діелектричної вставки.
3. Проведено числове моделювання за допомогою методу частинка-в-комірці процесів збудження кільватерних полів та динаміки прискорюваного згустку в плазмово-діелектричній структурі.
4. Досліджено вплив власного початкового емітанса згустку на його динаміку.
5. Запропоновано схему транспортування прискорюваних згустків за допомогою секцій плазмово-діелектричних кільватерних прискорювачів, розділених вакуумними вставками.

Результати, на яких базуються висновки дисертаційної роботи, були отримані з використанням надійно апробованих методів фізики плазми, теоретичної фізики та числових методів. З математичної точки зору зроблені наближення та застосовані методи є адекватними та доцільними. **Наукові положення, висновки і рекомендації**, що присутні в дисертації, є достатньо **обґрунтованими**.

Практична цінність результатів, що отримані в дисертації, обумовлена можливістю їх застосування для розробки моделей плазмово-діелектричних кільватерних прискорювачів та інтерпретації експериментальних даних, які можуть бути отримані на таких установках. Отримані в дисертації результати можуть бути використані в наукових центрах та університетах України та за її межами, де розвивається аналогічна тематика досліджень.

Основні результати дисертації **достатньо повно** викладено в 11 статтях у спеціалізованих фахових вітчизняних і міжнародних виданнях та **апробовано** в 15 доповідях на наукових конференціях.

В авторефераті повністю розкрито основні результати та положення, що виносяться на захист, і правильно відображено зміст дисертаційної роботи. Особистий внесок дисертанта в роботи, виконані зі співавторами, точно відображений у дисертації та авторефераті. Дисертаційна робота і автореферат написані грамотною науковою мовою.

Разом із цікавими фізичними результатами робота має і деякі недоліки:

1. З тексту дисертації важко зрозуміти, які числові методи автор використовував у кожному конкретному випадку (де метод Рунге-Кутти, а де власний або написаний іншими авторами метод частинка-в-комірці). Було б добре в додатку до дисертації представити особливості числових програм, що написані власноручно автором. Замість опису числових методів використовуються вирази «авторський код», «оригінальний код на C++» та «наш власний PIC код». Важко

також зрозуміти без уважного прочитання дисертації, чим «числові розрахунки» відрізняються від «моделювання» (автореферат, стор. 10).

2. Не зрозуміло з тексту автореферату та дисертації чи враховував автор те, що в експериментах діелектричні поверхні заряджаються від'ємно, біля стінок існує шар просторового заряду, а плазма є просторово неоднорідною. Було б добре пояснити, як все це може вплинути на згустки заряджених частинок.

3. У деяких випадках рисунки описані дуже стисло (наприклад, рис.1 в авторефераті; важко зрозуміти, що таке r на рис. 6 автореферату і чому ця величина є від'ємною), що затрудняє розуміння отриманих автором результатів.

4. Відсутнє пряме порівняння результатів отриманих автором з експериментальними результатами та числовими результатами, які були отримані раніше іншими авторами. Було б це добре зробити в деяких граничних випадках.

5. В дисертації присутні граматичні помилки: Наприклад, «так же» (стор. 18, 19), «ученных» (стор. 18), «длинные» (стор.13), в деяких місцях відсутні коми.

6. У деяких випадках важко зрозуміти, як автор отримав аналітичні вирази (наприклад, (4.1)-(4.3) на стор. 62, 63 дисертації).

7. У Змісті дисертації відсутній «Список використаних джерел».

Разом з тим, наведені зауваження не стосуються основних положень, що виносяться на захист, і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Висновок. Дисертаційна робота Князева Р.Р. є завершеною науковою працею, що містить нові науково обґрунтовані теоретичні результати в області знань про прискорення заряджених частинок кільватерними полями в плазмово-діелектричних структурах. Вважаю, що за актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, кількістю публікацій, новизною та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота Князева Романа Романовича «Прискорення заряджених частинок кільватерними полями в плазмово-діелектричних структурах» задовольняє вимогам ДАК МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013р. №567, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Офіційний опонент:

доктор фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри прикладної
фізики та фізики плазми фізико-
технічного факультету ХНУ імені В. Н. Каразіна



Денисенко І.Б.

Підпис *Г. В. Денисенко*
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар Харківського національного
університету імені В.Н.Каразіна

