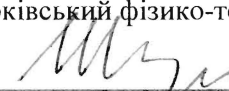


ФОРМУ ЗАТВЕРДЖЕНО
рішенням наукової ради Національного фонду
досліджень України
протокол № 1 від 19 березня 2021 року

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут»


М.Ф. Шульга
(підпис) (ПБ)
« » 2020 року



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок

**«Транспортування електронних/позитронних згустків при високоградієнтному
прискоренні електромагнітними полями, що збуджуються у діелектричних структурах»**

Назва конкурсу: «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»
Реєстраційний номер Проєкту: _2020.02/0299

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок 2020.02/0299
«Транспортування електронних/позитронних згустків при високоградієнтному прискоренні
електромагнітними полями, що збуджуються у діелектричних структурах»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»,) протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – _2022 рік
Тривалість виконання Проєкту у 2021 році
Початок – 14.05.2021
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення _15.12.2021
Загальна вартість Проєкту 10169614 грн.

Вартість Проєкту по роках, грн.:
1-й рік 2371980 грн.
2-й рік 3730527 грн.
3-й рік 4067107 грн.

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 9 виконавців, з них:

доктори наук 2 ;

кандидати наук 3 ;

інші працівники 4 .

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Грантоотримувач: Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»
Національної академії наук України.

Співвиконавців не залучено.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Розробка високоградієнтних прискорювачів нового покоління, що засновані на збудженні інтенсивних електромагнітних полів у діелектричних структурах або плазмі електронними згустками і лазерними імпульсами.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

1. Дослідити теоретично можливості транспортування згустків електронів та позитронів на великі відстані в плазмово-діелектричному кільватерному прискорювачі.

2. Модернізувати існуючу СРА лазерну систему. Побудувати макет діелектричного лазерного прискорювача на дифракційних решітках.

3. Теоретичні дослідження збільшення прискорюючих полів та поліпшення якості прискорених згустків в кільватерних схемах прискорювання в плазмі (методи LWFA та PWFA).

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- *Сучасний стан проблеми* (до 400 знаків)

Традиційні лінійні прискорювачі працюють з градієнтами $\sim 10\text{-}30$ МеВ/м. Щоб подолати ці обмеження інтенсивно розвиваються нові методи прискорювання. Дві основні прискорюючі структури розглядаються як кандидати для майбутніх прискорювачів, – плазма та діелектрик. Проте існують серйозні проблеми – розкид за енергією згустків, а також поперечна нестійкість згустків. Для зменшення розкиду за енергією і стримування нестійкості запропоновано декілька схем.

- *Новизна Проєкту* (до 400 знаків)

Але ці схеми або складні з точки зору практичної реалізації, або погіршують якість згустку та стримують отримання прогнозованих темпів прискорювання. Ми пропонуємо досліджувати альтернативні методи: фокусування згустків при заповненні каналу транспортування плазмою для пригнічення VBU нестійкості; профілювання ведучого лазерного імпульсу і ланцюжка згустків в методах PWFA і LWFA для зменшення енергетичного розкиду прискорених згустків.

- *Методологія дослідження* (до 400 знаків)

Для теоретичних досліджень будуть застосовані методи математичної фізики, теорії диференціальних рівнянь та теорії спеціальних функцій. При моделюванні транспортування і прискорення згустків у плазмових, діелектричних структурах будуть використані числові коди, які засновані на методі крупних частинок. Для експериментальних досліджень будуть використані методи експериментальної плазмової електроніки, радіофізики та фізики лазерів.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

Вивчено фокусування тестового позитронного й драйверного електронного згустків у діелектричному хвилеводі, заповненому як радіально неоднорідною так і однорідною плазмою з вакуумним каналом. Кільватерне поле збуджувалося електронним згустком у кварцовій діелектричній трубці, вставленої в циліндричний металевий хвилевід. Внутрішня область діелектричної трубки була заповнена плазмою з різними поперечними профілями щільності неоднорідними по радіусу з вакуумним каналом уздовж осі хвилеводу. Плазмова щільність для всіх досліджених випадків була настільки низкою, що плазмова частота була менше, ніж частота основної діелектричної моди. Результати чисельного PIC-моделювання показали можливість одночасного прискорення й фокусування тестового позитронного згустку в кільватерному полі. Найкраще прискорення виявлено у випадку відсутності плазми, однак при цьому відсутнє й фокусування тестового згустку позитронів.

Продемонстрована чисельним моделюванням 2,5D кодом LCODE можливість формування самоузгодженого поздовжнього розподілу прискорюючого кільватерного поля типу плато при використанні перспективного кандидата для зменшення емітансу та енергетичного розкиду прискореного згустку, а саме інжекцію зовнішнього пучка електронів в кільватерний прискорювач. Показано, що інжектований згусток призводить до формування плато, тобто однакового прискорюючого кільватерного поля, на поздовжньому розподілі кільватерного поля в області згустку, який прискорюється. Знайдений режим, коли плато підтримується протягом усього часу прискорення при зсуві прискорюваного згустку відносно прискорюючої кільватерної хвилі.

Проведено чисельне моделювання впливу профілю діелектричної структури на електричні поля, збуджені плоскою хвилею і гауссовим імпульсом, на прискорювачі на основі чіп-структур. Для моделювання були взяті такі типи профілю: прямокутний, циліндричний, канавковий, синусоїдальний, трикутний. На основі моделювання визначено, що при збудженні гауссовим імпульсом, який дає більше наближення до реального експерименту, діелектричні структури показують менший темп прискорення. Проведено чисельне моделювання впливу відстройки висоти прольоту електронів над структурою, на градієнти прискорення. Для вивчення ефекту розсинхронізації на невеликих відстанях, проведено моделювання для випадку електронів з початковою енергією 2.1 MeV з фазової розсинхронізацією близько 2%. На основі моделювання отримано, що у випадку моделювання з гаусовим імпульсом, значно істотніший вплив має відстройка висоти прольоту електронів, на відміну від випадку прискорення плоскою хвилею. Тому оптимальною відстанню буде прискорення на висоті прольоту пучка 200 нм від поверхні чіп-структури. Проведено чисельне моделювання для чіп-структур, що мають нанесене золоте покриття. У ході моделювання отримано максимальний градієнт прискорення для чіп-структури з трикутним профілем, яке дало 8 кратний приріст градієнту прискорення у порівнянні з випадком моделювання без нанесеного покриття.

На основі розробленої лінійної теорії генерації кільватерного поля електронними згустками, що інжектуються зі зсувом відносно вісі, в циліндричний плазмово-діелектричний хвилевод, проведено чисельний аналіз поздовжнього розподілу амплітуди радіальної сили, що діє на частинки драйверного згустку збоку кільватерного поля, що збуджується. Проведено спектральний аналіз кільватерного поля, що збуджується драйверним згустком, для випадків заповнення каналу для заряджених частинок плазмою, та випадку відсутності плазми в каналі. Показано, що у випадку відсутності плазми максимум в частотному спектрі радіальної сили відповідає власні НЕМ-хвилі з азимутальним числом l , в той же час у випадку наявності плазми відповідний максимум відповідає плазмовій хвилі. За допомогою числового моделювання методом «частинка в комірці» проведено аналіз поперечної динаміки частинок драйверного електронного згустку для перевірки результатів аналізу амплітуд кільватерного поля, що базуються на аналітичних виразах для компонент кільватерного поля, що збуджується. Продемонстровано

якісне узгодження результатів числового моделювання з прогнозами відповідної аналітичної теорії стосовно поведінки частинок, що знаходяться на огинаючих драйверного електронного згустку.

Досліджено можливість пригнічення ВВU-нестійкості позитронного згустку в прямокутному діелектричному кільватерному прискорювачі терагерцового частотного діапазону при неоднорідному плазмовому заповненні дрейфового каналу за допомогою 3-вимірного самоузгодженого PIC-коду SOM. Діелектричний хвилевід представляв собою металевий хвилевід із двома діелектричними пластинами, що покривали протилежні стінки хвилеводу. Канал дрейфу діелектричної структури заповнювався неоднорідною плазмою створеною згідно до умов капілярного розряду. Аналізувалася динаміка позитронного згустку, інжектваного у хвилевід зі зсувом до однієї з діелектричних платів слідом за електронним згустком, який створював кільватерне поле. Показано, що для обраної затримки позитронного згустку позитрони рухалися у прискорювачі у напрямку від найближчої діелектричної платви тому ВВU-нестійкість позитронного згустку не виникала.

Вивчено динаміку самоінжектованих прискорених згустків електронів, що прискорюються кільватерним пузирем в плазмі металевої щільності в залежності від параметрів лазерних імпульсів. Дослідження складається з п'яти задач, в яких вивчається динаміка самоінжектованих згустків в залежності від параметрів лазерних імпульсів. За варіації параметрів лазерів – амплітуди, ширини (подвійного радіусу), довжини (тривалості), просторової конфігурації імпульсів, було вивчено отримання самоінжектованих згустків з різними особливостями, відповідно до необхідних задач – отримані згустки з великою концентрацією електронів, малим просторовим й енергетичним розкидом, згустки, вздовж яких поле є приблизно однорідним, згустки з нульовою радіальною кільватерною силою та ін.

Отримано числовим моделюванням 2,5D кодом LCODE самоузгоджений поздовжній розподіл прискорюючого кільватерного поля типу плато при його збудженні довгим згустком електронів в нелінійному режимі. Показано, що інжектований згусток певного заряду та форми призводить до формування плато, тобто однакового прискорюючого кільватерного поля, на поздовжньому розподілі кільватерного поля в області згустку, який прискорюється. Знайдений режим, коли однакове прискорююче кільватерне поле підтримується протягом усього часу прискорення при зсуві прискорюваного згустку відносно прискорюючої кільватерної хвилі.

Ефективне прискорення позитронів у нелінійному режимі перекидання кільватерної хвилі в режимі їх фокусування – складна та інтенсивно досліджувана багатьма провідними лабораторіями світу проблема. Нам вдалось знайти числовим моделюванням 2,5D програмою LCODE параметри, при яких підтримується однакове прискорююче кільватерне поле для згустку позитронів протягом значної частини часу його прискорення при одночасному його знаходженні в фокусуєчому полі. Показано, що при певних інших параметрах вигідно для компенсації наростання енергетичного розкиду та емітансу зсув згустку, що прискорюється, використовувати режим, при якому однакове прискорююче кільватерне поле виникає всередині часу прискорення, а потім формується нахил розподілу прискорюючого поля, протилежний початковому.

Проведено тендер з метою придбання багатоканальної плати з фосфорним екраном MCP-25-2-40-P43, необхідної для детектування електронного пучка.

Створено зразки фотоемісійних катодів методом електролітичного травлення у різних електролітах для різних матеріалів катоду. Встановлено вакуумну камеру, отримано вакуум рівня 10^{-5} мм.рт.ст. На базі Arduino створено лабораторний макет високовольтного генератору для запуску електронної пушки, також на стадії зборки знаходиться інша схема високовольтного генератору на базі НОМ-10-66.

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Придбаний лазер накачування дозволяє модернізувати існуючу тераватну лазерну систему до рівня потужності 1-10 Твт. Оновлена лазерна система буде використана для вивчення прискорення електронного згустку в прискорювачах на чип-структурах і на дифракційних ґратках. Замовлений пікер імпульсів і генератор TG10 будуть використані для синхронізації пристроїв діелектричного прискорювача на чипах.

Науковий керівник Проєкту

Зав. відділу

Геннадій СОТНІКОВ



(підпис)