

ФОРМУ ЗАТВЕРДЖЕНО  
рішенням наукової ради Національного фонду  
досліджень України  
протокол № 20 від 04-07 вересня 2020 року

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

  
М.Ф. Шульга  
(підпис) (ПІБ)  
« 11 » 12 2020 року  
М.П.  


**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**  
про виконану роботу у 2020 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**

Тривалість виконання Проєкту 3 роки  
Початок – дата укладання Договору про виконання наукових досліджень і розробок;  
Закінчення – 2022 рік.

Загальна вартість Проєкту, грн. \_\_\_\_\_  
9807693

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 1209501 грн.

2-й рік 4999169 грн.

3-й рік 3599023 грн.

**2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ**

до виконання Проєкту буде залучено   8   виконавців, з них:

доктори наук           2          ;

кандидати наук           3          ;

інші працівники           3          .

### **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)**

В процесі тестування наявних РІС числових кодів LCODE (K.Lotov), UMKA (Dudnikova et al), та власного коду SOM на коректність розрахунків з використанням щільної плазми (в тому числі металевої щільності) та потужнострумових згустків заряджених частинок було виявлено, що вони коректно описують фізичні явища та їх результати збігаються з аналітичними результатами та результатами других авторів.

В ході дослідження було продемонстровано, що за допомогою лазерних імпульсів в плазмі, щільність якої приблизно дорівнює щільності електронів в металах, можливо збуджувати рекордне кільватерне поле прискорення з амплітудою, що за абсолютним значенням сягає кількох теравольт на метр, що приблизно в  $10^5$  разів більше, ніж в сучасних металевих прискорюючих структурах. Особливо велике кільватерне поле досягається на етапі, коли перші самоінжектвані і прискорені згустки починають разом з лазерними імпульсами збуджувати кільватерне поле. До того ж показано, що варіація параметрів інжектованих лазерних імпульсів суттєво впливає на конфігурацію й амплітуду кільватерного поля. Було вивчено декілька випадків різних параметрів лазерних імпульсів та встановлено наступне. Запропонований до розгляду перший випадок, що отримав умовну назву «еталонний» загалом є оптимальним. Порівняно доброго результату вдалось досягнути лише шляхом збільшення радіусу кожного з імпульсів. Трохи зменшивши радіус кожного імпульсу отримано згустки малого просторового розкиду, які перебувають у відносно невеликому полі прискорення, але досить добре фокусуються. Збільшивши інтенсивність лазерного імпульсу, вдається трохи збільшити амплітуду поля прискорення після першого лазерного імпульсу.

Розпочато дослідження фокусування тестового позитронного й драйверного електронного згустків у діелектричному хвилеводі, заповненому радіально неоднорідною плазмою з вакуумним каналом за допомогою РІС-моделювання у власному чисельному коді SOM. Кільватерне поле збуджувалося електронним згустком у кварцовій діелектричній трубці (діелектрична проникність 3.75) із зовнішнім і внутрішнім діаметрами 1.2 мм та 1.0 мм, відповідно, вставленої у циліндричний металевий хвилевід. Енергія електронів драйверного згустку дорівнювала 5 GeV, заряд провідного згустку  $-3$  нКл, його довжина становила 0.2 мм, діаметр згустку становив 0.9 мм. Тестовий згусток позитронів мав ті ж параметри що й ведучий за винятком заряду, який дорівнював 0.05 нКл. Внутрішня область діелектричної трубки була заповнена плазмою різними поперечними профілями щільності: профіль щільності, створюваний у капілярному розряді й неоднорідна по радіусу щільність із 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 РІС-моделювання показали, що можливе одночасне прискорення й фокусування тестового позитронного згустку у кільватерному полі, створюваному драйверним електронним згустком. Вакуумний канал у неоднорідному плазмовому циліндрі погіршує фокусування прискореного згустку позитронів, але сприяє підвищенню його прискорення. На

Проведено аналітичні та числові дослідження дисперсійних характеристик та топографій електричних та магнітних полів азимутальних власних мод діелектричної прискорювальної структури циліндричної конфігурації з каналом для заряджених частинок, що заповнено плазмою. Побудовано аналітичні вирази для аксіальних, радіальних, та азимутальних компонент електричного та магнітного полів власних мод діелектрично-плазмового хвилеводу. Отримано трансцендентне дисперсійне рівняння для власних мод хвилеводу, що розглядається, що пов'язує частоту власних мод з хвильовим числом. Для обраних параметрів хвилевода та електронного згустку з енергією 4.5 MeV знайдено резонансні частоти перших чотирьох власних ТМ-мод. Досліджено залежності фазової та групової швидкостей від поздовжнього хвильового числа. Проаналізовано поперечну структуру (топографію) аксіальної компоненти електричного поля, радіальної компоненти електричного поля, та азимутальної компоненти магнітного поля перших чотирьох резонансних ТМ-мод. Для опису плазми було використано гідродинамічне.

Проведено чисельне моделювання розподілу електричного поля в ЧП структурах, з різними типами профілю, що знаходяться як в серійному, так і в одиничному виробництві. Для моделювання були взяті такі типи профілю: циліндричний, напівкруглий, поглиблений напівкруглий, синусоїдальний, трикутний і прямокутний.

На основі моделювання отриманий результат, що ЧП-структури які мають велику глибину канавок, мають менше гальмівне поле над канавками. В якості оптимальної, обрана прямокутна структура, яка забезпечує прискорення на всій траєкторії руху частинки, уздовж прискорюючої структури де поле діє на частинку. Максимальна і мінімальна енергія поля дорівнює відповідно:  $E_{\max}=1.27 \cdot 10^9$  В/м,  $E_{\min} = 3.1 \cdot 10^8$  В/м.

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

Немає.

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

Немає

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

Придбані матеріали дозволяють модернізувати до 10 ТВт існуючу СРА лазерну систему та проводити дослідження в областях гравіметрії, матеріалознавства, отримання рентгенівського і гамма-випромінювання, а також для діагностики плазми в експериментах з термоядерного синтезу. Визначені параметри кільватерного поля, що збуджується лазерним імпульсом в нелінійному режимі в плазмі металевої щільності, залежно від параметрів лазерного імпульсу дозволять визначити шляхи подальшого підвищення темпів прискорення.

Примітка: Анотований звіт не повинен містити відомостей, заборонених до відкритого опублікування

**Науковий керівник Проєкту**

Зав. відділу

Сотніков Г.В



(підпис)