

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
кафедра фізичної електроніки

До захисту допущено:

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри _____ Анатолій ВЕКЛИЧ
«_23_» травня 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Розігрів електронів плазми при взаємодії потужної електромагнітної
хвилі з плазмовим бар'єром»

Виконав:

студент 2-го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали
ОП «Прикладна фізика та наноматеріали»
Михайленко Богдан Романович _____

Науковий керівник:

д.ф.-м.н., проф. Анісімов Ігор Олексійович _____

Рецензент:

к.ф.-м.н., ст.н.с. Добровольський Андрій Миколайович _____

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань
Студент _____

Робота допущена до захисту в ЕК рішенням кафедри фізичної електроніки
від «17» травня 2023 р., протокол № 31.

Завідувач кафедри фізичної електроніки,
доктор фіз.-мат. наук, професор
Веклич Анатолій Миколайович _____

РЕФЕРАТ

Обсяг роботи 20 сторінок, 8 рисунків, 18 посилань.

В даній роботі представлено результати комп'ютерного моделювання взаємодії потужного електромагнітного пучка з шаром щільної плазми без зіткнень, проведеного в програмному пакеті PICongGPU. Досліджено процес підвищення енергії електронів фонові плазми. Було показано що дві групи електронів набувають дуже значних енергій: ті, що безпосередньо взаємодіють з падаючою хвилею, та ті, що виходять з області утвореного каналу в забар'єрну область. Відсутність помітного розігріву електронів в області утворення каналу свідчить про те, що основну роль в цьому процесі відіграє пондеромоторна сила зумовлена нерівномірністю електромагнітного поля падаючої хвилі. Також показано процес чисельного розсіювання плазмового бар'єру при проведенні моделювання в 2.5D геометрії. Досліджено вплив цього ефекту на процес утворення каналу при низькій амплітуді падаючої хвилі. Виявлено що навіть при амплітуді меншій в 10 раз, ніж у попередньому дослідженні, утворення каналу є можливим, а середня енергія електронів і іонів знижується на 2 порядки. Показано що моделювання в 3D геометрії дозволяє виявляти тонкі ефекти, такі як квазі-періодичне збурення густини та енергії електронів.

**ПЛАЗМА, ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПРОМІНЬ, КОМП'ЮТЕРНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОСВІТЛЕННЯ БАР'ЄРІВ, ПАКЕТ PICONGGPU.**

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Огляд літератури	5
2. Опис пакету моделювання та моделі	8
2.1 Параметри моделі	8
2.2 Алгоритм Particle-in-Cell	9
2.3 Алгоритм бінарних зіткнень	9
2.4 Пакет PIconGPU	10
3. Результати моделювання	11
3.1 Дослідження розігріву електронів та іонів	11
3.2 Повільне просвітлення слабким пучком	14
3.3 Фільтрація швидких іонів в процесі візуалізації	17
4. Обговорення отриманих результатів	19
Висновки	20
Перелік посилань	22

ВСТУП

Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що навіть за відсутності електрон-іонних зіткнень, лінійна гідродинамічна теорія передбачає, що щільна плазма без магнітного поля є непрозорою для електромагнітних хвиль. Проте існує ряд механізмів проникнення названих хвиль через бар'єри, такі як просвітлення бар'єрів, квазіпрозорість - перенесення хвиль через бар'єри тим чи іншим способом, а також інформаційна прозорість - перенесення інформації про падаючу хвилю в забар'єрну область[1].

Проблема проникнення хвиль всередину бар'єрів та крізь них, а також передачі інформації крізь бар'єри, виникає у зв'язку з неоднорідністю та непрозорістю реальної плазми. Такі задачі є актуальними через їхнє прикладне застосування, наприклад, у випадку необхідності встановлення радіозв'язку з космічним апаратом під час повернення на Землю. У цьому випадку шар щільної плазми, який утворюється перед апаратом, перешкоджає проходженню хвиль. Аналогічні проблеми виникають при проникненні радіосигналів з поверхні Землі в області над максимумом густини іоносферної плазми на певних частотах, коли плазма стає непрозорою. Такі ситуації також спостерігалися в супутникових експериментах. Мікрохвильова діагностика плазми на проходження є ще однією областю застосування, де аналізовані ефекти можуть спотворити отримані результати.

Комп'ютерне моделювання процесу просвітлення плазмового бар'єру потужною електромагнітною хвилею формує мету даної роботи. Таке моделювання дозволяє спостерігати деталі процесів, наприклад, миттєві просторові розподіли густини електронів та іонів, електричного поля та інші, виміри яких недоступні у лабораторному експерименті. Це надає додаткову інформацію для порівняння результатів комп'ютерного моделювання з теоретичними моделями.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Одним з можливих механізмів просвітлення є руйнування плазмового бар'єру за рахунок витіснення з нього плазми або перерозподілу її концентрації полем потужної електромагнітної хвилі, що падає на бар'єр. Вивчення таких нелінійних ефектів набуває додаткової актуальності у зв'язку з проблемою лазерного термоядерного синтезу, оскільки відповідні експерименти зазнали невдачі саме з причини видавлювання плазми з мішені через нерівномірність її опромінювання [2].

Свого часу було теоретично запропоновано декілька можливих механізмів руйнування плазмових бар'єрів падаючою електромагнітною хвилею:

- Утворення хвилеводного каналу в плазмі без зіткнень під дією стрикційної сили з боку неоднорідного хвильового поля [3]. В результаті відбувається виштовхування плазми з області сильного електромагнітного поля, зменшення густини плазми на шляху поширення пучка хвиль, утворення самопідтримуваного хвилеводного каналу в бар'єрі та самоканалізація хвиль у ньому.

- Утворення хвилеводного каналу в плазмі із помітними електронними зіткненнями під дією нагрівної нелінійності, обумовленої параметричним збудженням ленгмюрівської хвилі. При нормальному падінні плоскополяризованої електромагнітної хвилі на шар плазми збуджені за параметричним механізмом ленгмюрівські хвилі поширюються в напрямку електричного поля падаючої хвилі, тобто їхній хвильовий вектор лежить у площині бар'єру. Ці хвилі ефективно згасають на зіткненнях із важкими частинками, внаслідок чого температура електронів зростає, а їхня густина відповідно зменшується. В результаті знову утворюється самопідтримуваний хвилеводний канал [4].

- Періодичний перерозподіл густини плазми, обумовлений полем стоячої електромагнітної хвилі. При нормальному падінні електромагнітної хвилі на шар закритичної плазми з різкими межами врахування стрикційної сили з боку поля стоячої хвилі приводить до перерозподілу концентрації плазми вздовж напрямку поширення хвилі. В результаті може виникнути просторово періодичний (із періодом порядку вакуумної довжини падаючої хвилі) розподіл густини плазми, і шар плазми стає частково прозорим [5].

- Періодичний перерозподіл густини плазми, обумовлений параметричним збудженням ленгмюрівської хвилі. Як уже згадувалося, нормальне падіння електромагнітної хвилі на плазму може супроводжуватися параметричним збудженням ленгмюрівських хвиль. Розвиток модуляційної нестійкості таких ленгмюрівських хвиль приводить до того, що в їхньому полі початково однорідна за густиною плазма під дією стрикційної сили стає шаруватою, а її діелектрична проникність – знаковмінною. Якщо просторовий період неоднорідності плазми значно менший за довжину електромагнітної хвилі, плазма стає прозорою. Далі процес розшарування повторюється в наступних скін-шарах, і хвиля проникає все глибше в бар'єр [6]. Цей механізм може реалізуватися на початковій стадії взаємодії обмежених хвильових пучків із плазмою, коли ефекти макроскопічного перерозподілу густини плазми ще не встигають розвинути [3].

Перші два механізми, що приводять до формування каналу в бар'єрі, відомі як механізми "повільного" просвітлення, а два останні, які передбачають перерозподіл концентрації на помітно менших масштабах – як "швидке" просвітлення.

Просвітлення плазмових бар'єрів для електромагнітних хвиль експериментально досліджувалося в роботах [7-11]. Експерименти проводились у плазмі, що розпадалася [7, 4, 9-10] чи створювалася високочастотним полем зі спадною з часом інтенсивністю [8, 11]. Тому і висота, й ширина плазмового бар'єра зменшувалися з часом аж до зникнення останнього. При збільшенні потужності падаючої хвилі понад деяке критичне значення хвиля за бар'єром з'являлася до його розпаду. Це критичне значення зростало зі збільшенням надкритичності бар'єру (відношення максимальної концентрації плазми в бар'єрі до критичної концентрації плазми на частоті падаючої хвилі).

Автори робіт [8, 11] пов'язали виявлене просвітлення з розшаруванням плазми в результаті розвитку модуляційної нестійкості ленгмюрівських хвиль, параметрично збуджених падаючою електромагнітною хвилею [3, 6]. На користь такого висновку свідчить, на їхню думку, залежність просвітлення бар'єра для сигнальної хвилі малої потужності хвилею великої потужності від взаємної орієнтації їхніх площин поляризації [8]: просвітлення наявне, якщо електричні поля обох хвиль паралельні, і відсутнє, коли вони взаємно перпендикулярні.

Результати робіт [4, 7, 9-10], на думку їхніх авторів, краще узгоджуються з механізмом формування хвилеводного каналу внаслідок нагрівання електронної компоненти плазми в бар'єрі [3]. На нашу думку, таке нагрівання може бути спричинене полем падаючої хвилі в скін-шарі й не обов'язково вимагає параметричного збудження ленгмюрівських хвиль.

В роботі [12] досліджувався вплив поляризації падаючої потужної електромагнітної хвилі на просвітлення бар'єрів щільної плазми. Було показано, що «швидке» просвітлення має місце як для лінійної, так і циркулярної поляризації падаючої хвилі, що, на думку авторів, свідчить про те, що неоднорідності, які виникають у плазмі, на відміну від теоретичних передбачень [3, 6], є, принаймні, двовимірними. Виникнення цих неоднорідностей гіпотетично пов'язується з турбулентною динамікою плазми в полі падаючої електромагнітної хвилі.

Подальші експерименти [13-14] із застосуванням діагностичної електромагнітної хвилі зафіксували не лише деполяризацію, але й доплерівське розширення спектру цієї хвилі та появу в ньому сателітів, зсунутих на частоту іонно-звукових хвиль. Діагностична хвиля дозволила також помітити існування просвітлення протягом деякого (1-1,5 мкс) часу після вимкнення потужної хвилі накачування. Ці результати автори пов'язали з формуванням у плазмі тривимірних дрібномасштабних неоднорідностей на етапі її «швидкого» просвітлення.

Таким чином, лабораторні експерименти підтвердили факт існування ефекту просвітлення в двох варіантах – "швидкого" (до формування хвилеводного каналу) та "повільного". "Швидке" просвітлення пов'язується з перерозподілом густини плазми. В той же час питання про співвідношення результатів експерименту із запропонованими теоретичними

механізмами донедавна залишалося відкритим.

Виконане нами раніше моделювання взаємодії потужного пучка електромагнітних хвиль із шаром щільної плазми [15-16] показало, що більшість теоретично запропонованих механізмів просвітлення в моделюванні не спостерігається. Було зроблено висновок, що формування каналу (повільне просвітлення бар'єру) зумовлене пондеромоторною силою з боку неоднорідного електромагнітного поля, а швидке просвітлення – турбулентним рухом плазми в полі потужної електромагнітної хвилі.

Мета даної роботи – з'ясувати деталі розігрівання плазми потужним пучком електромагнітних хвиль та роль зіткнень електронів з іонами в цьому процесі.

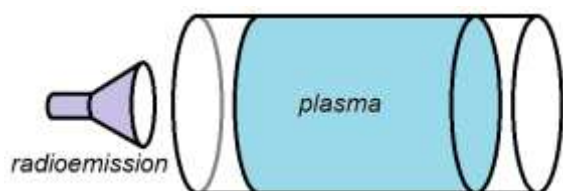
2. ОПИС ПАКЕТУ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ

2.1. Параметри моделі

Для комп'ютерного моделювання був обраний пакет PIConGPU [18], за допомогою якого можна проводити обрахунок алгоритму крупних частинок у комірках з прискоренням на графічних процесорах. В цьому пакеті описується електромагнітна взаємодія, плоска геометрія, також пакет дозволяє описувати ефекти на релятивістських швидкостях. Сам алгоритм частинок у комірках не передбачає зіткнення електронів з іонами, однак частинки можуть взаємодіяти опосередковано через наявність теплових флуктуацій електричного поля, на яких електрони можуть розсіюватися.

Розглядається задача про нормальне падіння імпульсу плоскополяризованих електромагнітних хвиль на плоский шар плазми за відсутності зовнішнього магнітного поля. Електричне поле хвилі лежить у площині моделювання. Інтенсивність падаючого імпульсу характеризується гауссівським розподілом в напрямку y і однорідним – у напрямку x (рис. 1).

На бічних межах об'єму моделювання електромагнітне поле поглинається.



*Рис.1. Схема області моделювання
(реальні пропорції порушені)*

Для моделювання було обрано такі параметри: плазма воднева, повністю іонізована, густина плазми – $4 \cdot 10^{12} \text{см}^{-3}$ (електронна плазмова частота – 18 ГГц); температура плазми – 0.5 eV (плазма ізотермічна); товщина плазмового шару – 56 см, його радіус – 23 см; довжина падаючої хвилі – 3.33 см (частота – 9 ГГц, тобто плазма непрозора для цієї хвилі); тривалість електромагнітного імпульсу – 7.1 нс; радіус імпульсу (на половині інтенсивності) – 5 см. В нашій роботі наведені наведені результати моделювання для амплітуд електричного поля $1.93 \cdot 10^6 \text{В/см}$ (слабка хвиля), $3.86 \cdot 10^6 \text{В/см}$ (помірна хвиля) та $7.71 \cdot 10^6 \text{В/см}$ (потужна хвиля). Але в процесі моделювання амплітуда електричного поля змінювалася в широкому діапазоні. Змінювалася також концентрація плазми та маса іонів.

2.2. Алгоритм Particle-in-Cell

Particle in cell (PIC) - це числовий метод, що використовується для моделювання фізичних явищ в плазмі, наприклад, плазмових пристроїв, прискорювачів частинок та інших систем. Основна ідея методу полягає у тому, що простір розбивається на малі кубики, в яких в кожній точці знаходиться множина заряджених частинок (електронів або іонів). Ці частинки взаємодіють між собою за допомогою електромагнітного поля, яке розраховується відповідно до розташування частинок та їх зарядів.

У процесі моделювання кожна заряджена частинка рухається відповідно до законів Ньютона, а поля розраховуються за допомогою різницевих методів. Для отримання точніших результатів, можна використовувати більш складні методи, такі як метод дворідинної гідродинаміки, що поєднує в собі основні ідеї методу частинок та методу скінченних різниць.

Одна з головних переваг методу PIC полягає в тому, що він дозволяє досліджувати явища на дуже малих масштабах, таких як розмір електрона або довжина хвилі світла. Крім того, метод дозволяє досліджувати складні взаємодії між частинками, що не можуть бути відтворені за допомогою аналітичних методів.

Однак, метод PIC має свої обмеження, зокрема, він вимагає значних обчислювальних ресурсів, особливо для великих систем. Крім того, метод потребує досить високої точності обчислень, оскільки дуже малі помилки можуть призвести до значних відхилень від реальних результатів.

2.3. Алгоритм бінарних зіткнень

Метод Particle-in-cell (PIC) не враховує парні зіткнення між частинками в обчисленнях, але це зазвичай залежить від конкретної реалізації методу. Деякі варіанти PIC можуть включати зіткнення частинок як окремий етап обчислень, в той час як інші можуть ігнорувати цей ефект.

Проблема з включенням зіткнень між частинками полягає в тому, що розрахунки стають значно більш складними. Зіткнення можуть бути взаємодією між будь-якою парою частинок, що призводить до значного збільшення кількості обчислень. Це може зробити метод непрактичним для моделювання великих систем.

Для розв'язання цієї проблеми можна використовувати метод бінарних зіткнень (binary collisions), який дозволяє ефективно розраховувати зіткнення між частинками. В основі методу лежить припущення, що зіткнення відбуваються тільки між парами частинок, а не між кожною парою в системі.

Метод бінарних зіткнень розраховується шляхом випадкового вибору пари частинок та моделювання їх зіткнення. Це може бути зроблено, наприклад, шляхом застосування

закону збереження енергії та кількості руху, щоб визначити нові швидкості та напрямки руху частинок після зіткнень.

Метод бінарних зіткнень є ефективним компромісом між точністю та ефективністю обчислень. Він дозволяє враховувати зіткнення між частинками, не вимагаючи складних обчислень для кожної пари в системі, що робить його практичним для великих систем.

2.4. Пакет PIConGPU

PIConGPU (Particle-in-Cell on GPU) - це відкритий програмний пакет для чисельного моделювання плазми, який базується на методі частинок-в-комірках (Particle-in-Cell, PIC) та використовує обчислювальну мережу на базі графічних процесорів (GPU).

PIConGPU був розроблений в Гельмгольцовському центрі захисту від радіації в Німеччині та використовується для дослідження різних фізичних процесів в плазмі, таких як ударні хвилі, розряди в газах, взаємодія лазерного випромінювання з плазмою, акустичні та електромагнітні хвилі та багато іншого.

Основною перевагою PIConGPU є висока ефективність обчислень, яка досягається завдяки використанню графічних процесорів замість традиційних процесорів. Крім того, PIConGPU є масштабованим та може працювати на кластерах комп'ютерів з сотнями та тисячами GPU.

Пакет PIConGPU надає користувачам можливість моделювання різних фізичних процесів з високою точністю та швидкістю, а також зручним інтерфейсом та великою кількістю налаштувань для різних вимог користувачів.

PIConGPU є відкритим програмним забезпеченням та розповсюджується під ліцензією GPL. Для розробки та підтримки пакету використовуються такі мови програмування, як C++, CUDA та Python. Крім того, PIConGPU має активну спільноту користувачів та розробників, яка постійно працює над покращенням пакету та додаванням нових функцій.

3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Дослідження розігріву електронів та іонів

У статті [16] ми розглядали залежність часу просвітлення плазми від амплітуди падаючого електромагнітного променя та густини плазмового бар'єру. Нагадаємо, що ми визначили частоту падаючої хвилі для наших досліджень таким чином, щоб плазма з густиною менше 10^{12}см^{-3} була для неї абсолютно прозорою. Закритичність бар'єру визначається як співвідношення між густиною бар'єру та цим характерним значенням і складає 4 для більшості експериментів. Однак вченими проводилися експерименти[8] з плазмою і з вищою закритичністю, і ми зацікавилися розвитком системи при таких параметрах. Також ми помітили певну відмінність між цими експериментами і нашим моделюванням, а саме, у них плазмовий бар'єр був вужчим. При встановленні цих параметрів в нашому моделюванні ми провели подальші дослідження.

Ми також хотіли визначити, яку роль відіграють зіткнення між зарядженими частинками в розвитку цього ефекту, оскільки РС-алгоритм передбачає взаємодію частинок лише через електромагнітне поле. Для відповіді на це питання ми використали алгоритм бінарних зіткнень [17]. Однак правильна робота цього алгоритму вимагає великої кількості частинок на одну комірку.

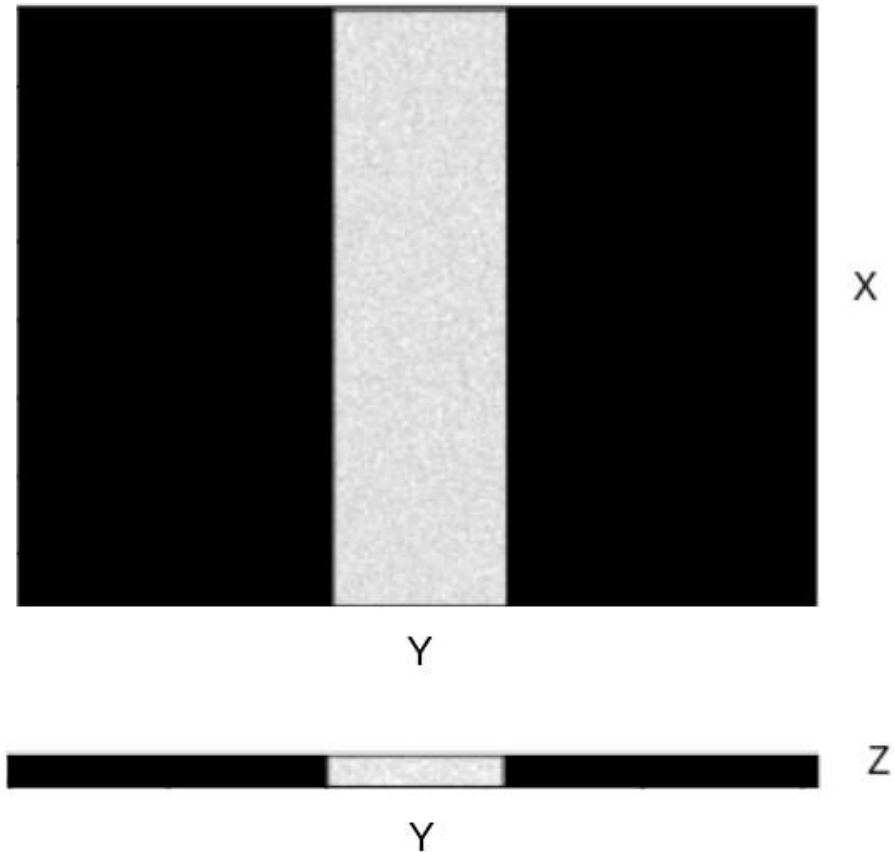


Рис.2. Вигляд області моделювання при скороченні вісі Z в 16 разів

Збільшення кількості частинок потребувало б збільшення об'єму доступної пам'яті, що можливо лише за наявності більшої кількості відеокарт. Одна відеокарта, на якій проводилися дослідження, за об'ємом пам'яті дозволяла проводити моделювання об'ємом близько 20 мільйонів частинок. З увімкненням алгоритму бінарних зіткнень це число зменшувалось до 10 мільйонів частинок.

Виходячи з цього обмеження ми вирішили перейти до використання 2.5D моделювання. У 2.5D моделюванні, частинки рухаються у трьох вимірах (x, y, z), але залежність від зміни виміру z обмежена (рис. 2). У такому випадку, система розглядається як безкінечно повторювана в напрямку зміни, що зменшується. За допомогою цього переходу нам вдалося досягти більшої щільності моделювання при збереженні вимірності (як ми бачили раніше поведінка 2D та 3D системи відрізняється).

Підсумовуючи все вищесказане, було збільшено середню кількість частинок на комірку. Але через обмеженість обчислювальних ресурсів це призвело до необхідності зменшити вертикальний розмір області моделювання (по вертикалі використовуються періодичні граничні умови). Зазначимо що збільшення кількості частинок на комірку не впливає на фізичні параметри плазми, кожній частинці надається така вага щоб досягти необхідної густини профілю плазми. Але через періодичність системи вздовж вісі Z бар'єр і електромагнітний пучок стають не обмеженими вздовж цієї вісі. В моделюванні враховуються електрон-електронні та електрон-іонні зіткнення.

Для моделювання було обрано такі параметри: плазма воднева, повністю іонізована, густина плазми – $9 \cdot 10^{12} \text{см}^{-3}$ (електронна плазмова частота – 27 ГГц); температура плазми – 0.5 eV (плазма ізотермічна); товщина плазмового шару – 12.5 см, його радіус – 21.5 см; довжина падаючої хвилі – 3.33 см (частота – 9 ГГц, тобто плазма непрозора для цієї хвилі); тривалість електромагнітного імпульсу – 25.3 нс; радіус імпульсу (на половині інтенсивності) – 5 см. В роботі наведені результати моделювання для амплітуд електричного поля $3.86 \cdot 10^6 \text{В/см}$ (помірна хвиля [15]). Але в процесі моделювання амплітуда електричного поля змінювалася в широкому діапазоні.

Результати моделювання представлені на рис. 3-4, відрізняються моментом часу. На обох малюнках представлені просторові розподіли енергії та концентрації частинок (зліва електрони, праворуч іони). Зверху - розподіл питомої енергії, знизу - концентрації частинок.

Іони майже не нагріваються внаслідок падіння електромагнітного пучка, а електрони нагріваються лише в зоні контакту з цим променем (рис. 4). Зони з підвищеною концентрацією електронів не проявляють значного розігріву. Іони з великою швидкістю рухаються до стінок. Даний ефект пов'язаний з тим, що електронам надається висока енергія, внаслідок контакту з електромагнітним променем і вони покидають область моделювання. В результаті порушення електронейтральності частина електронів починає

рухатися до стінок. Таких іонів менше 5% і вони не мають значного впливу на поведінку системи.

Також на рис. 3, що відповідає початковому моменту формування каналу в плазмі, можна помітити формування квазіперіодичного збурення густини та енергії електронів, які можна попередньо співвіднести з теоретичними передбаченнями [4]. Пам'ятаємо що початкова ініціалізація моделювання відповідає холодним електронам і іонам, проте можна побачити на рис. 4 що внаслідок взаємодії з електромагнітним пучком енергія, яку набувають електрони, значно перевищує їх початкову теплову енергію. А на пізніх стадіях формування каналу в бар'єрі спостерігається дві групи електронів з великою енергією. По-перше, це електрони, які вилітають з бар'єра назустріч падаючій електромагнітній хвилі. По-друге, електрони, які вилітають в забар'єрну область з каналу, що формується в бар'єрі.

З приводу врахування зіткнень можна сказати, що зіткнення призводять до розширення шару нагрітих електронів на межі каналу, що формується вглиб бар'єру. Проте ми не спостерігаємо помітного розігріву електронів в області каналу, що свідчить про те, що головну роль в цьому процесі грає пондеромоторна сила, обумовлена неоднорідністю високочастотного електромагнітного поля падаючої хвилі.

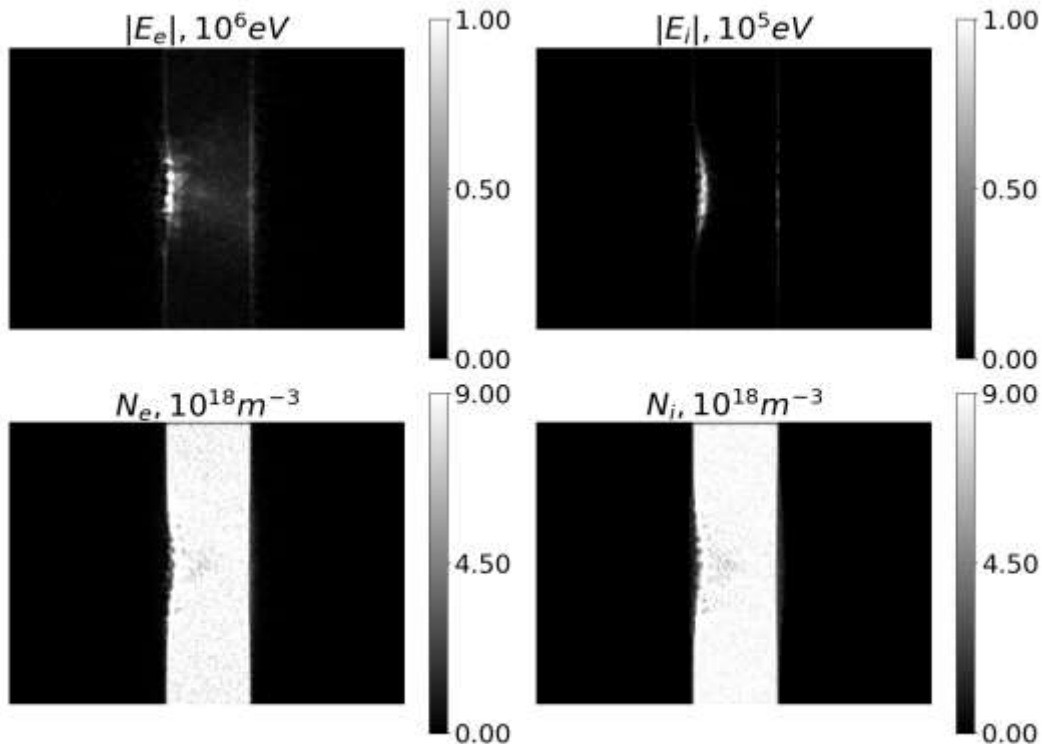


Рис. 3. Розподіл середньої енергії та густини електронів та іонів, при падінні електромагнітного променя, в момент часу 3,1 нс

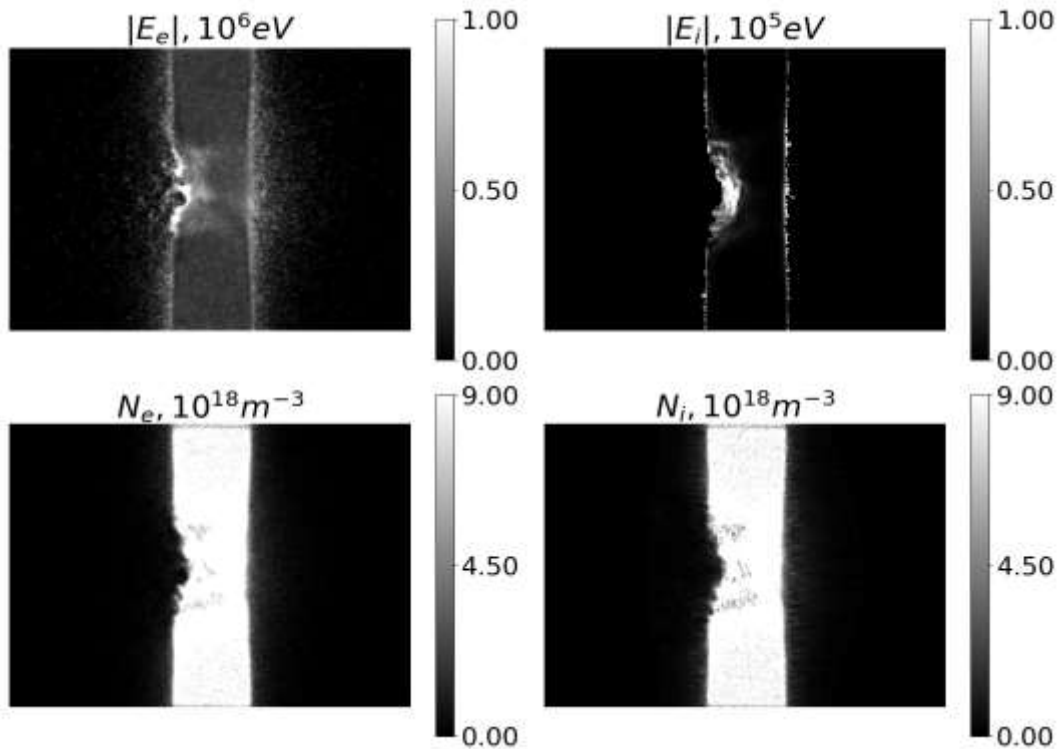


Рис. 4. Розподіл середньої енергії та густини електронів та іонів, при падінні електромагнітного променя, в момент часу 7,6 нс

3.2. Повільне просвітлення слабким пучком

Дослідження питання про мінімальну амплітуду електромагнітної хвилі, необхідну для формування каналу в плазмі, залишається невирішеним незважаючи на значний об'єм пророблених моделювань. Детальний аналіз моделювання (рис. 4) показав недолік підходу 2.5D вимірності. При взаємодії з електромагнітним пучком, електрони прискорюються і можуть покинути область моделювання. Однак, в цьому випадку вздовж вертикальної осі область моделювання є періодичною та дуже вузькою, що створює можливість циклічного руху прискорених частинок та їх зіткнення з іншими частинками. Це призводить до прискореного розмивання плазмового бар'єру (рис. 5) та конкуренції цього ефекту з продавлюванням каналу. Цей числовий артефакт сповільнює, якщо не робить неможливим формування каналу, маскуючи його за паразитними ефектами.

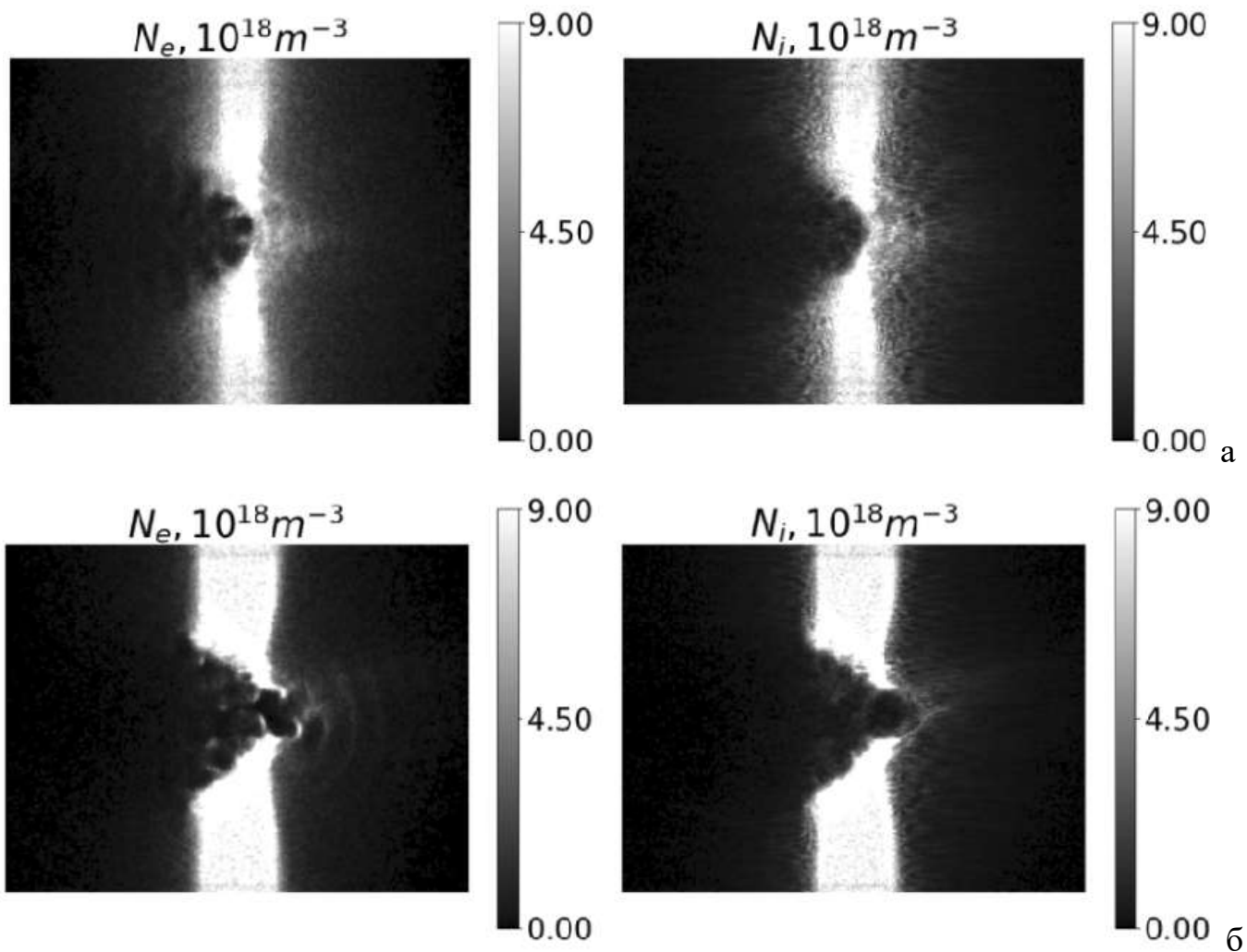


Рис.5. Розмивання плазмового бар'єру для 2.5D (а), 3D (б)

Даним числовим ефектом можна знехтувати для моделювань з невеликою тривалістю експерименту. Проте це не властиво для просвітлення плазми слабким пучком. Тому ми вирішили провести повне тривимірне моделювання. Для цього експерименту ми зменшили потужність падаючої хвилі в 10 разів в порівнянні з (рис. 4), та збільшили час моделювання в 10 разів. Проте це не розв'язує проблему швидкого розмивання бар'єру. При переході до повного тривимірного моделювання об'єм пам'яті та обчислень збільшується на порядок аж до 100 мільйонів частинок. І ми провели одне таке моделювання.

Узагальнюючи маємо такі параметри: плазма воднева, повністю іонізована, густина плазми – $9 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$ (електронна плазмова частота – 27 ГГц); температура плазми – 0.5 eV (плазма ізотермічна); товщина плазмового шару – 12.5 см, його радіус – 21.5 см; довжина падаючої хвилі – 3.33 см (частота – 9 ГГц, тобто плазма непрозора для цієї хвилі); тривалість електромагнітного імпульсу – 253 нс; радіус імпульсу (на половині інтенсивності) – 5 см. Наведені результати моделювання для амплітуд електричного поля $0.386 \cdot 10^6 \text{V/cm}$ (в 10 раз слабше за помірну хвилю [15]).

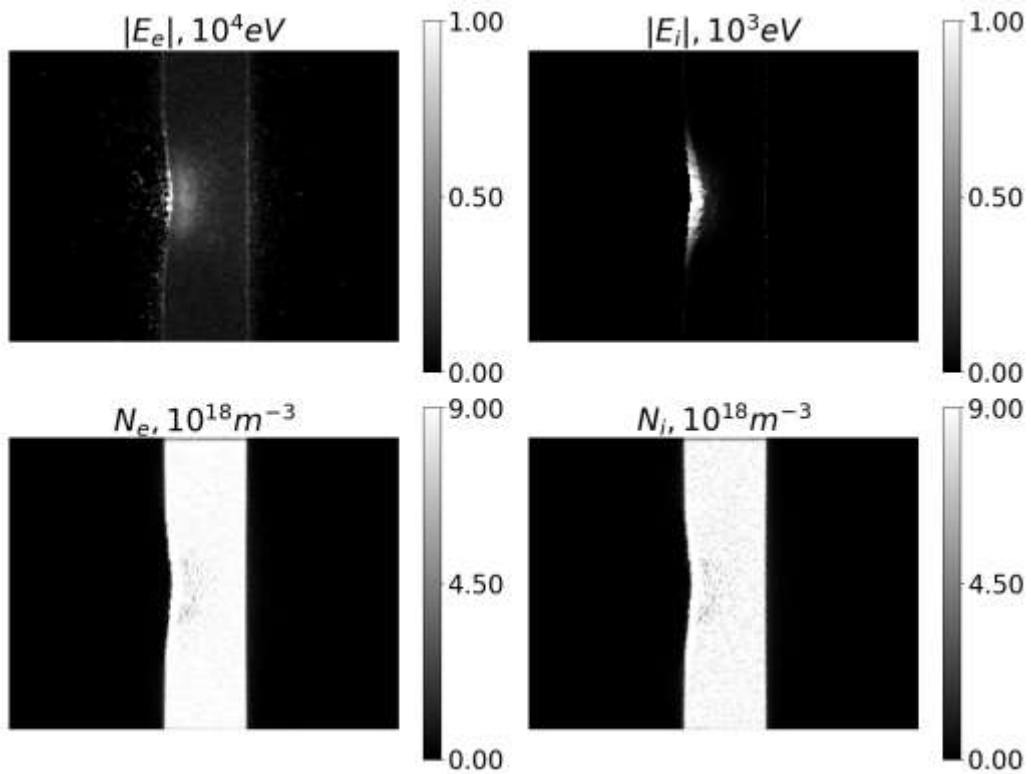


Рис.6. Розподіл середньої енергії та густини електронів та іонів, при падінні електромагнітного променя, в момент часу 30.4 нс

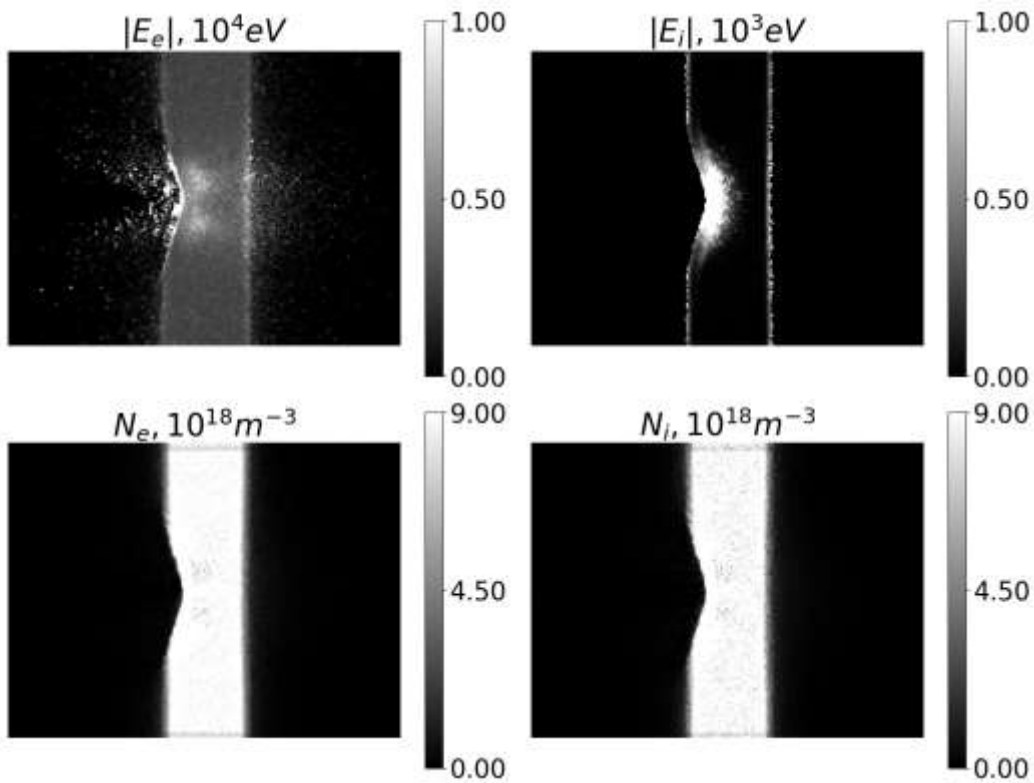
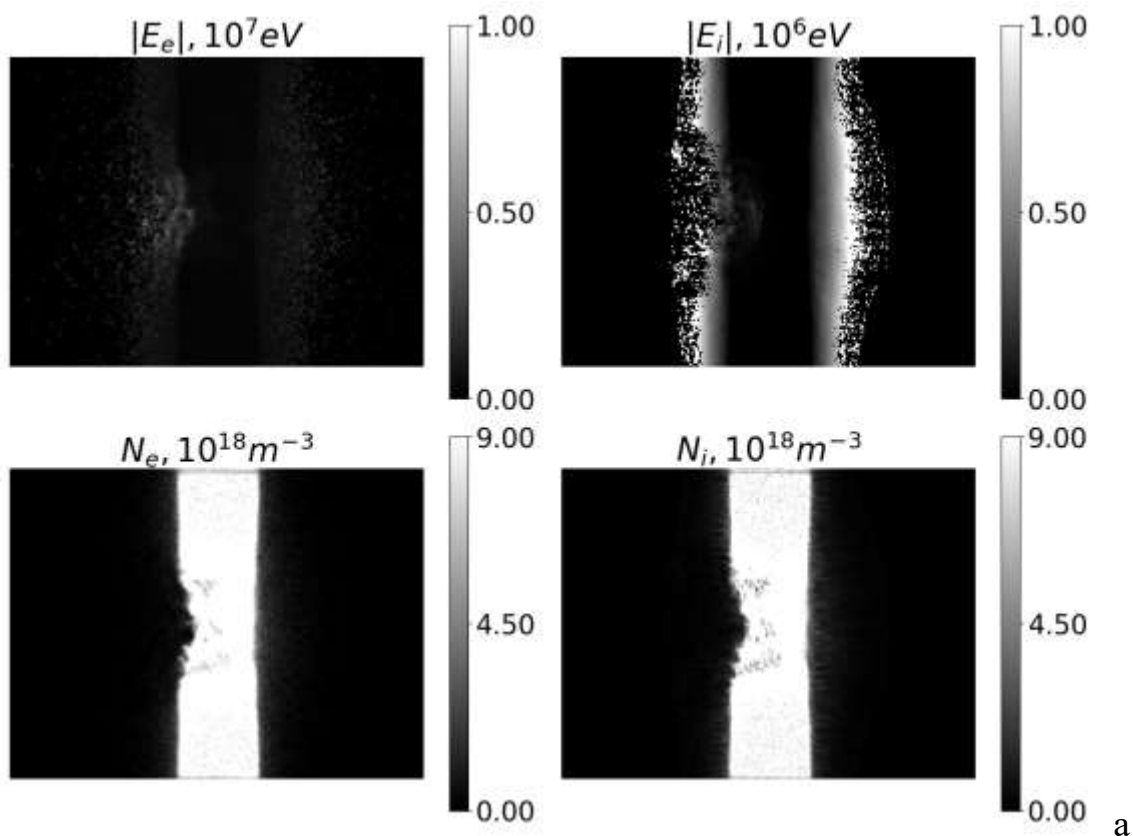


Рис.7. Розподіл середньої енергії та густини електронів та іонів, при падінні електромагнітного променя, в момент часу 60.7 нс

Можна побачити (рис. 6-7), що продавлювання каналу спостерігається і для значно слабшої електромагнітної хвилі, проте лише за умови слабого розмивання каналу. При чому кількість видалених частинок, які вилетіли за область моделювання зменшилось з 5% до 0.1% за еквівалентний час моделювання. Ми бачимо більш чисте зображення на якому можна досліджувати більш тонкі ефекти. Також можна помітити що середня енергія електронів набула через взаємодію з електромагнітним пучком зменшилась на 2 порядки.

3.3. Фільтрація швидких іонів в процесі візуалізації

При перших спробах візуалізації розподілу енергії електронів та іонів стало помітно, що ми отримали не інформативну візуалізацію. Замість того щоб досліджувати розігрів іонів плазми ми спостерігаємо як вони з високою швидкістю летять на стінку. Як вже зазначалось це пов'язано з тим, що електрони мають високу кінетичну енергію, і деяка частина покидає область моделювання, що призводить до порушення електронейтральності. За ними на стінку починають прискорений рух іони. І цей ефект не несе такого критичного значення як на це справляє враження візуалізація.



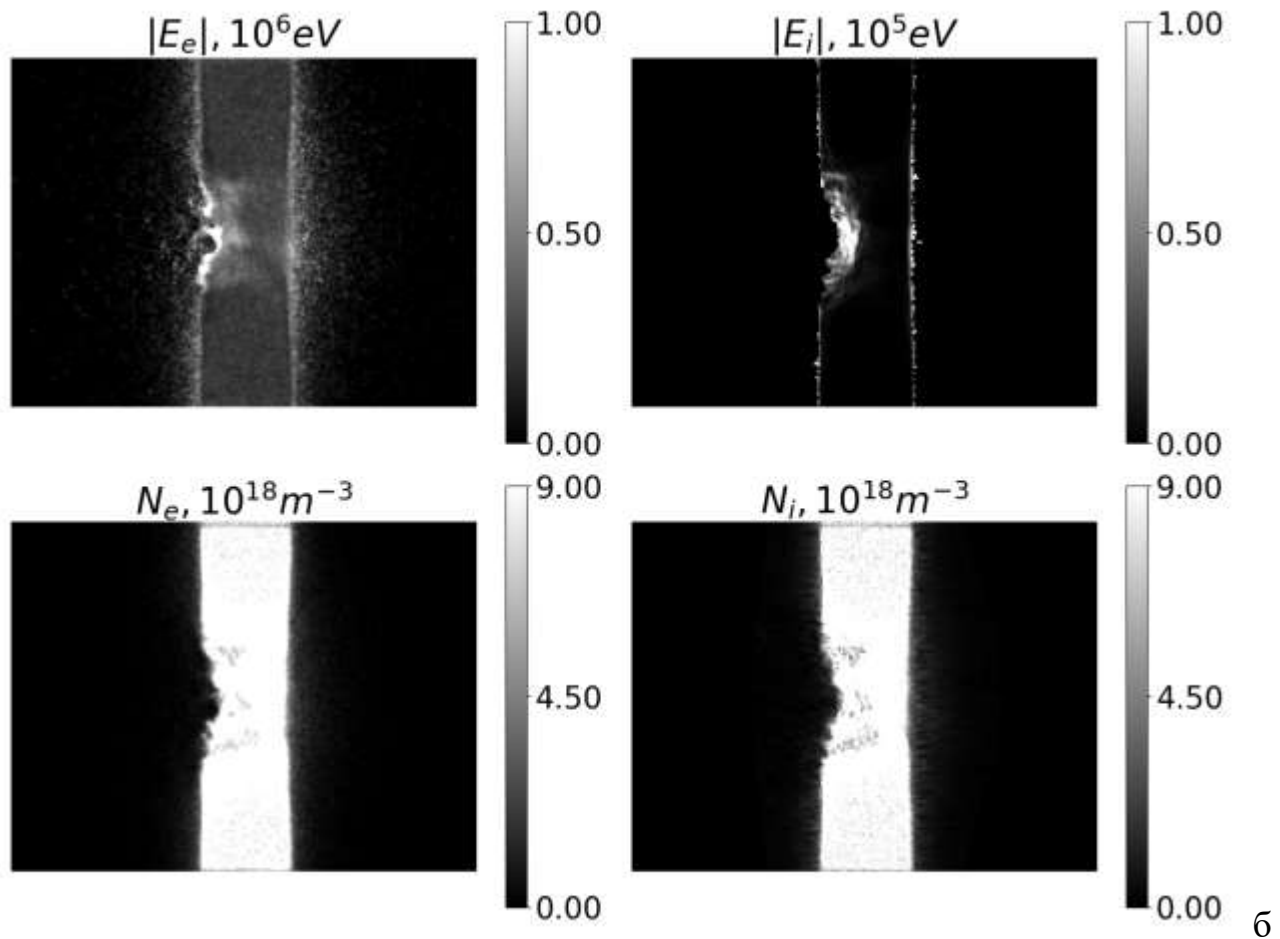


Рис.8. Без фільтрації (а), фільтрація комірок з концентрацією частинок менше 5% від середньої концентрації частинок бар'єру (б)

Пригадаємо умови та обмеження в яких ми проводимо чисельне моделювання. Через те що у нас 10 мільйонів частинок ми не можемо зберігати енергію кожної з них, для подальшої обробки та отримання необхідних даних. Тому ми записуємо сумарну енергію частинок на кожному комірку області моделювання. Це зручно робити бо сама паралельність досягається також і через векторизацію по коміркам. Також, зазвичай, комірок на один-два порядки менше ніж частинок. Коли ми отримали сумарну енергію на кожному комірку, ділимо цю енергію на концентрацію частинок в кожній комірку, отриману аналогічним способом. Але може статися випадок, коли комірка має високу енергію і низьку концентрацію частинок (не забуваємо що ми аналізуємо усереднені характеристики частинок всередині однієї комірки). Саме ця умова поєднує дрейфуючі до стінок іони. А оскільки їх мало (хоч вони і високоенергетичні) вони не несуть значного впливу на систему, проте заважають аналізу розподілу енергії всередині бар'єру. Тому ми додали умову фільтрації комірок, які мають концентрацію частинок нижче за 5% від концентрації частинок в області бар'єру (рис. 8).

4. ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порівняємо отримані результати з висновками роботи [16]. Раніше ми стверджували що розігрів електронів плазми може бути одним з факторів просвітлення разом зі стрікційною силою, вплив якого розкривається для "повільного" просвітлення. В даній роботі ми напряму досліджували це питання. Ми показали що врахування зіткнень призвело лише до незначного підвищення середньої енергії електронів, при тому, що час формування каналу в плазмі змінився на величину співрозмірною з похибкою проведення моделювання.

Перш за все розігрів електронів призводив не до пришвидшення формування каналу в плазмі а до формування двох груп електронів з великою енергією. По-перше, це електрони, які вилітають з бар'єра назустріч падаючій електромагнітній хвилі. По-друге, електрони, які вилітають в забар'єрну область із каналу, що формується в бар'єрі. Причому початкова теплова енергія електронів дуже мала в порівнянні з енергією в кінці моделювання. Що дозволяє зробити висновок, що плазма набуває значної енергії внаслідок взаємодії з падаючою хвилею. І енергія електронів на два порядки вище за енергію іонів.

В минулій роботі ми описували квазіперіодичне збурення густини. За допомогою методів аналізу та візуалізації середньої енергії частинок нам вдалось помітити, що квазіперіодичне збурення пов'язано з підвищенням не лише густини електронів а і їх енергії, що добре видно на відповідних візуалізаціях. Подібні спостереження збігаються з теоретичними напрацюваннями [4].

Перехід до 2.5D геометрії призвів до значного числового розмивання бар'єру, яке можна пов'язати з циклічним рухом прискорених електронів всередині області моделювання які не можуть покинути її і стикаються з іншими частинками, розсіюючи їх. Дане припущення було перевірено за допомогою проведення двох повних 3D моделювань з високою кількістю частинок на комірку. Спостерігалось значне зменшення швидкості розмивання плазмового бар'єру, що відкрило можливість до проведення нових експериментів для спостереження більш тонких ефектів.

Показано що формування каналу в плазмі може спостерігатися і за амплітуд падаючої електромагнітної хвилі в десять разів менше за значення обране в межах цього дослідження. Було гарно видно конкуренцію продавлювання та розмивання плазмового бар'єру, де продавлювання переважало за умови низької температури плазми.

Спостерігалось не значне нагрівання іонів, лише в околі контакту бар'єра з електромагнітною хвилею. Даний висновок було важко зробити через те що іони які летіли на стінку через порушення електронейтральності системи мали набагато більшу енергію. Відповідні методи фільтрації за густиною дозволити отримати гарні візуалізації до описаних ефектів.

ВИСНОВКИ

Проведено моделювання процесу просвітлення бар'єру щільної плазми пучком потужних електромагнітних хвиль за допомогою пакету PIConGPU.

1. В початковий момент часу в плазмі в області падіння пучка електромагнітних хвиль формується квазіперіодичне збурення густини та енергії електронів, які можна попередньо співвіднести з теоретичними передбаченнями [4].
2. Енергія, яку набувають електрони в результаті взаємодії з електромагнітною хвилею, значно (на півтора порядки) перевищує їх початкову теплову енергію.
3. На пізніх стадіях формування каналу в бар'єрі спостерігається дві групи електронів з великою енергією. По-перше, це електрони, які вилітають з бар'єра назустріч падаючій електромагнітній хвилі. По-друге, електрони, які вилітають в забар'єрну область із каналу, в бар'єрі.
4. Врахування зіткнень призводить до розширення шару нагрітих електронів на межі каналу, що формується вглиб бар'єру.
5. Відсутність помітного розігріву електронів в області каналу свідчить про те, що головну роль в цьому процесі його формування грає, обумовлена неоднорідністю високочастотного електромагнітного поля падаючої хвилі.

Результати роботи частково опубліковані в статтях:

- B.R. Mykhailenko, I.O. Anisimov. Transillumination of the dense plasma barrier by the strong beam of electromagnetic waves: computer simulation. // Problems of Atomic Science and Technology. 2020, №6 (130). Series: Plasma Physics. Pp. 64-68.
- B.R. Mykhailenko, I.O. Anisimov. Modes of transillumination of the dense plasma layer via electromagnetic beam. // Problems of Atomic Science and Technology. 2021, №4 (134). Series: Plasma Physics. Pp. 3-7.

Та оприлюднені в доповідях на конференціях:

- XVI International Conference “Electronics and Applied Physics” (2020, Kyiv, Ukraine)
- XX International young scientists’ conference on applied physics (2020, Kyiv, Ukraine)
- International Conference for Young Professionals in Physics and Technology (2021, Kharkiv, Ukraine)
- XXI International young scientists’ conference on applied physics (2021, Kyiv, Ukraine)
- XXII International young scientists’ conference on applied physics (2022, Kyiv, Ukraine)
- XXIII International young scientists’ conference on applied physics (2023, Kyiv, Ukraine).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. І.О.Анісімов, Л.І.Романюк. Просвітлення, квазіпрозорість та інформаційна прозорість хвильових бар'єрів у неоднорідній плазмі. // Український фізичний журнал. Огляди. 2010. Т.6. №2. С. 101-139.
2. R.Betti, O.A.Hurricane. Inertial-confinement fusion with lasers // *Nature Physics*. 2016. Vol. 12. P. 435-448.
3. А.Г.Литвак. Динамические нелинейные электромагнитные явления в плазме. В кн. *Вопросы теории плазмы* вып. 10, Атомиздат, М., 1980. С. 164-242.
4. Г.М.Батанов, В.А.Силин. Нелинейное проникновение сильного СВЧ-поля в слой плотной бесстолкновительной плазмы. // *Труды ФИАН им. Лебедева*, **73**, 87-103 (1974).
5. А.Г.Литвак. Самофокусировка и волноводное распространение в плазме. // *УФН* **107**, вып. 3, 515-516 (1972).
6. А.Г.Литвак, В.А.Миронов, Г.М.Фрайман. О самовоздействии электромагнитных волн в плазме при модуляционной неустойчивости. // *Письма в ЖЭТФ* **22**, вып. 7, 368-371 (1975).
7. Г.М. Батанов, В.А. Силин. Самовоздействие электромагнитной волны в плотной бесстолкновительной плазме. // *Письма в ЖЭТФ* **14**, вып. 8, 445-448 (1971).
8. Ю.Я. Бродский, Б.Г. Ерёмин, А.Г. Литвак, Ю.А. Сахончик. Самоканализация мощных электромагнитных волн в плотной плазме // *Письма в ЖЭТФ* **13**, вып. 3, 136-139 (1971).
9. М.И. Брижинева, Б.Г. Ерёмин, А.В. Костров, А.Д. Степанушкин, Г.М. Фрайман. Тепловое просветление плазмы в магнитном поле под действием электромагнитной волны // *Физика плазмы* **6**, вып. 3, 559-564 (1980).
10. Б.Г. Ерёмин, А.В. Костров, А.Д. Степанушкин, Г.М. Фрайман. Параметрический нагрев электронов в высокочастотном поле миллиметрового диапазона // *Физика плазмы* **2**, вып. 3, 414 (1976).
11. Ю.Я. Бродский, В.Л. Гольцман, В.А. Миронов, С.И. Нечуев. Экспериментальное исследование взаимодействия электромагнитного поля с плазменным слоем. // *ЖЭТФ* **74**, вып. 5, 1636-1649 (1978).
12. Г.М.Батанов, Ю.В.Задирака, С.М.Левитский, В.А.Силин, В.А.Цыганков. Нелинейное проникновение электромагнитных волн различной поляризации в плотную бесстолкновительную плазму. // *Препринт ФИАН №160* (1979). - 20 с.
13. Г.М.Батанов, Ю.В.Задирака, С.М.Левитский, С.Н.Сатунин, В.А.Силин, Л.В.Синьковская. Перераспределение концентрации зарядов при воздействии мощной электромагнитной волны СВЧ диапазона на плотную бесстолкновительную плазму. // *III Всесоюзная конференция по физике газового разряда. Тезисы докладов*. К., 1986. Ч.1. С.74-76.
14. G.M.Batanov, S.N.Satunin, V.A.Silin, L.V.Sin'kovskaya, Yu.V.Zadiraka, S.M.Levitsky. Density variation in the plasma layer due to the nonlinear transparency caused by the field of the strong electromagnetic wave. // *1987 International Conference on Plasma Physics. Proceedings, Contributed Papers*. Kiev, 1987. Vol.1. Pp.188-192.
15. B.R. Mykhailenko, I.O. Anisimov. Transillumination of the dense plasma barrier by the strong beam of electromagnetic waves: computer simulation. // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2020, №6 (130). Series: Plasma Physics. Pp. 64-68.
16. B.R. Mykhailenko, I.O. Anisimov. Modes of transillumination of the dense plasma layer via electromagnetic beam. // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021, №4 (134). Series: Plasma Physics. Pp. 3-7.
17. D. P. Higginson, I. Holod, and A. Link. A Corrected Method for Coulomb Scattering in Arbitrarily Weighted Particle-in-Cell Plasma Simulations. // *J. Comp. Phys.* **413**, 109450 (2020).
18. M Bussmann, H Baur, TE Cowan, A Debus, A Huebl, G Juckeland, T Kluge, WE Nagel, R Pausch, F Schmitt, U Schramm, J Schuchart, and R Widera. Radiative signatures of the relativistic Kelvin-Helmholtz instability. // *SC'13 Proc. Int. Conf. High Perform. Comput. Networking, Storage Anal*. Vol. 60. 4. 2013, pp. 1-12.