

АНОТАЦІЯ

Бондар Д. С. Дослідження збудження полів в плазмі та діелектрику потужними лазерними імпульсами та релятивістськими електронними згустками задля прискорення, фокусування та нагріву електронів і позитронів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено теоретичному (за допомогою числового моделювання) дослідженню задач, пов'язаних питанням збудження кільватерних полів, питанням прискорення й фокусування згустків заряджених частинок, зокрема, створенню плазмової лінзи для фокусування релятивістських згустків позитронів, питанням використання ефектів самоінжекції та неоднорідності плазми. Використовувалося обчислення методом частинок в комірках, що, передбачає розв'язання рівнянь Максвелла. В дослідженні енергія частинок самоінжекттованих згустків ефективно характеризувалася поздовжнім імпульсом. Самоінжекттовані згустки, завдяки методам їхнього утворення, можуть мати широкий набір енергій (необхідних досліднику). А саме, в роботі йде мова про вивчення збудження кільватерних полів в плазмі, густина якої дорівнює густині електронів в твердому тілі (металах) ($n_e \approx 10^{22} \text{ см}^{-3} - 10^{23} \text{ см}^{-3}$) рентгенівським лазерним імпульсом (потужна електромагнітна хвиля); дослідження формування, властивостей та ролі електронних солітонних каверн в інерційному синтезі, а також згладжування поперечних неоднорідностей в критичній точці за умов взаємодії лазерного імпульсу з неоднорідною плазмою в інерційному синтезі; окрім того, були знайдені параметри для плазмової лінзи, яка дозволила б

однаково та однорідно фокусувати послідовності релятивістських позитронних згустків; важливим питанням було дослідження амплітуди кільватерного поля та коефіцієнту трансформації за збудження кільватерних полів послідовністю згустків заряджених частинок в плазмі та діелектрику. Було досліджено збудження поля в плазмі послідовністю згустків електронів в нерезонансному випадку. Вивчається спосіб утримання самоінжективаних згустків в фазі прискорення кільватерної хвилі, а також, вплив зовнішнього магнітного поля на електронні згустки, що збуджують кільватерне поле в плазмі. Розглянуто процес комбінованого лазеро-плазмового прискорення, завдяки якому можливо забезпечити трансфер енергії між самоінжекттованими згустками й кільватерною хвилею. В ході дисертаційного дослідження було вивчено питання збудження кільватерного поля в плазмі твердотільної густини, тобто такої, що дорівнює густині вільних електронів в металах. Разом з використанням рентгенівських лазерних імпульсів, використання плазми з такими параметрами дозволяє забезпечити збудження кільватерних полів прискорення з амплітудою, що досягає кількох (в дослідженні близько 2-4 й більше) теравольт на метр. Було продемонстровано, що за означених умов кільватерний процес супроводжується формуванням самоінжектованих згустків електронів в області суттєвого негативного просторового заряду, а також формуванням області з підвищеною густиною іонів, яка забезпечує значне поле прискорення. Як наслідок – самоінжектовані згустки можуть бути прискорені в значному електричному полі. Було встановлено, що за різних параметрів лазерних імпульсів, величина поздовжнього кільватерного поля прискорення може досягати теравольт на метр за порядком величин. Самоінжектовані згустки рухаються вздовж кільватерного пузиря без руйнування протягом 100 періодів лазера. Окрім того, спостерігається так званий режим комбінованого лазеро-плазмового прискорення. Цей режим дозволяє зберегти та використати енергію лазерного імпульсу, що руйнується під час розповсюдження в плазмі. Енергія лазерного імпульсу передається самоінжектованим згусткам в разі потрапляння згустків в фази прискорення,

далі, коли згустки перебувають в фазах уповільнення кільватерної хвилі, їхня енергія передається хвилі, а хвиля прискорює наступні самоінжектовані згустки. Це призводить до збільшення амплітуди поля прискорення до пролонгації процесу прискорення й, як наслідок, поліпшення ефективності процесу. Наступним питанням дослідження було вивчення процесу когерентного складання полів прискорення після лазерних імпульсів у ланцюжку. Спосіб (закон) складання полів прискорення після лазерних імпульсів в лінійному випадку є добре відомим: якщо лазерні імпульси однакові, то поля прискорення після них співвідносяться як $A_1:A_2:A_3 = 1:2:3$, де індекси i використовуються для позначення номеру лазерного імпульсу, A_i – амплітуда. В нелінійному випадку когерентне складання порушується, лазерні імпульси можуть потрапляти в фази прискорення кільватерної хвилі. На відміну від попередньої задачі, це негативний ефект – енергія хвилі втрачається. Один зі шляхів розв'язання цієї проблеми – так зване «підлаштування». Механізм «підлаштування» було досліджено авторами й представлено в результатах дослідження. Завдяки йому, вдалося частково відновити механізм когерентного складання в нелінійному випадку. Після останнього лазерного імпульсу послідовності, що потрапляв в фазу уповільнення кільватерної хвилі, спостерігалось збільшення амплітуди поля прискорення за використання «підлаштування». В ході дослідження питання, було виявлено ефект зростання амплітуди кільватерного поля після лазерних імпульсів. Було знайдено, що амплітуда поля прискорення може до 6 разів перевищувати значення амплітуди поля прискорення після першого лазерного імпульсу.

Вивчалось використання неоднорідної плазми задля підтримки процесу прискорення самоінжектованого згустку й підвищення градієнту прискорення. В дисертаційній роботі розглянуто спосіб збільшення густини електронів плазми, що призводить до динамічного зменшення розміру кільватерного пузиря, вздовж якого рухається згусток електронів.

Було вивчене питання знаходження параметрів задля забезпечення якомога меншого просторового та енергетичного розкиду самоінжекттованих згустків. Використано механізм профілювання, що дозволило отримати самоінжекттований згусток, просторовий розмір якого в кілька разів менше за розмір кільватерного пузиря. Було вивчено просторовий та енергетичний розкид згустків. Отримані значення є відносно малими й дозволяють використовувати згустки в подальших дослідженнях в разі експериментальної реалізації механізму.

Описані вище дослідження поєднані питанням збудження кільватерного поля рентгенівськими лазерними імпульсами за умови густини плазми, що дорівнює густині вільних електронів в металах. Це дослідження наразі розглядається в якості перспективного. Для реалізації подібного темпу прискорення, необхідні лазери з параметрами, досягнення яких можливе теоретично й наразі досліджується. Експерименти з кільватерного прискорення наразі вже відбуваються, їхній темп та масштаб зростає в таких проектах, як EuPRAXIA.

Водночас, потрібно зазначити, задачі, що вивчалися, припускають масштабування – це детальніше роз'яснюється в тексті розділів. Масштабування дозволяє адаптувати результати конкретних задач для інших параметрів системи, для іншої конкретної задачі без необхідності повторних розрахунків. Як добре відомо, зменшення фізичних розмірів прискорювачів разом зі збільшенням їх ефективності (темпів прискорення) є нагальною потребою. Більш того, відомі зараз діелектричні й металеві структури через фізичне явище електричного пробоя не дозволяють отримати градієнти прискорення понад 100 MeV на метр (в деяких окремих випадках до 40 GeV на метр за особливих умов, наприклад, в капілярі). Тож, кільватерне прискорення в плазмі дозволяє вирішити одразу два завдання й створити компактний й ефективний прискорювач нового типу для заряджених частинок.

Фокусування позитронних згустків є необхідним в будь-якому сучасному електрон-позитронному колайдері. В запропонованій роботі

вивчається плазмова лінза для фокусування згустків, що дозволяє однаково та однорідно фокусувати послідовності релятивістських позитронних згустків. Пропонується конфігурації плазмових лінз. Вони досліджуються шляхом числового моделювання. Всі випадки отримані для згустків з розподілом по Гауссу (в наближенні косинусу) відповідно до відстані між ними та відношення заряду. Довжини згустків було обрано такими, що дорівнюють $L_b = \lambda/2$. Було показано, що згустки фокусуються однаковими силами, а їхні центри фокусуються гірше, ніж фронти. Серед випадків розглядався випадок профільованої послідовності згустків, для якої струм перших 5-ти згустків дорівнює $2k - 1$, $k \leq N$, $N = 5$. Дослідження є новим та актуальним, адже фокусування позитронів є досить складною задачею, оскільки позитронний згусток притягує електрони плазми. Через це сила фокусування є неоднорідною. Для заданих параметрів системи в дослідженні представлено однорідне фокусування послідовності релятивістських згустків. Результати дослідження можуть отримати практичну реалізацію з відповідним фокусуванням.

В роботі було виконано дослідження амплітуди кільватерного поля та коефіцієнту трансформації за збудження кільватерних полів послідовністю згустків заряджених частинок в плазмі та діелектрику. В роботі досліджено збудження кільватерного поля послідовністю згустків заряджених частинок в діелектричному резонаторі. Виконано числове моделювання інжекції згустків заряджених частинок (електронів) до діелектричного резонатору (стрижень із діелектрика з металевим кожухом) й збудження кільватерного поля. Відомо, що максимальне значення коефіцієнту трансформації TR , що дорівнює, в спрощеному, лінійному випадку, відношенню максимального поля прискорення після згустку до максимального поля уповільнення в середині згустку, складає $TR = 2$ для одного згустку. В роботі було продемонстровано, що у випадку інжекції послідовності згустків з певними параметрами, зокрема,

з довжиною, що дорівнює $0,5\lambda$ довжини кільватерної хвилі, можна отримати значення коефіцієнту $TR = 2N$, де N – це кількість згустків.

В роботі шляхом двовимірного числового моделювання вивчено еволюцію кільватерної сили фокусування, що діє на згустки електронів при розповсюдженні електронних згустків у плазмі в залежності від довжини згустку та відстані між згустками для різних профілів струму згустку.

В ході дослідження для послідовності довгих релятивістських електронних згустків було знайдено механізм, який призводить до резонансного збудження кільватерного поля навіть у випадках, коли частота інжекції згустків відрізняється від частоти плазми. В цьому випадку, частина згустків, що потрапляють в фази дефокусування, втрачаються. За рахунок цього процесу синхронізація відновлюється. Однак, водночас, дефокусовані згустки перестають брати участь у збудженні кільватерного поля. За допомогою відносно невеликого магнітного поля (може бути забезпечено постійними магнітами), можливо повернути згустки на вісь системи в потрібні фази, відновивши синхронізацію. Згустки, що повернулися, підтримують резонансне збудження кільватерного поля. Під час дослідження було виконано числове моделювання збудження нелінійної кільватерної хвилі в плазмі релятивістським електронним згустком з густиною заряду, що зростає за законом Гаусса, а потім зменшується (різко до 0).

Досліджено залежність коефіцієнту трансформації та максимального поля прискорення від довжини згустку при незмінному заряду згустку. Було знайдено, що довжина згустку $7\lambda/4$ в нелінійному випадку є оптимальною. За неї можна досягти коефіцієнту трансформації $TR \approx 6$ (за рахунок довжини згустку та нелінійності). Збільшення коефіцієнту трансформації призводить до поліпшення ефективності прискорення кільватерним полем.

Також вивчено залежність радіальної сили від довжини згустків та відстані між згустками. Розглядався випадок згустків з однорідним розподілом струму вздовж згустку, а також, згусток зі зростанням струму. Таким чином,

результати дослідження можуть бути реалізовані практично для розв'язання труднощів, що виникають в лабораторних умовах та пов'язані з процесами, що описані у відповідних задачах. Представлені в дисертаційній роботі результати в той чи інший спосіб дозволяють підвищити ефективність прискорювачів заряджених частинок: дозволяють зробити їх більш компактними й підвищити градієнти прискорення.

Ключові слова: числове моделювання, кільватерне поле, магнітне поле, електричне поле, плазма, плазмова лінза для фокусування згустків, стрижень із діелектрика, коефіцієнт трансформації, розподіл по Гауссу, згусток електронів, густина іонів, обчислення методом РС, рівняння Максвелла, енергія частинок, лазер.

ABSTRACT

Bondar D. S. Study of excitation of fields in plasma and dielectric by powerful laser pulses and relativistic electron bunches for acceleration, focusing and heating of electrons and positrons. - Qualification scientific paper, Manuscript.

Thesis for scientific degree Doctor of Philosophy by specialty 105 – “Applied physics and nanomaterials” (Branch of knowledge 10 - Natural sciences). – V. N. Karazin Kharkiv National University. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the theoretical (by numerical simulation) research of a number of problems related to the excitation of wakefield, to the investigation of processes of accelerating and focusing bunches of charged particles, the finding of a plasma lens for focusing relativistic bunches of positrons, the investigation of the effects of self-injection and plasma inhomogeneity. PIC calculation method was used which involves the solution of Maxwell equations. In the study, the energy of the particles of self-injected bunches was effectively characterized by longitudinal momentum. Self-injected bunches, due to the methods of their formation, can have a wide range of energies (necessary for the researcher). Namely, the paper deals with the study of excitation of wakefield in plasma, the density of which is equal to the electron density in metals ($n_e \approx 10^{22} \text{ cm}^{-3} - 10^{23} \text{ cm}^{-3}$) by an X-ray laser pulse (powerful electromagnetic wave); study of the formation, properties and role of electron soliton cavities in inertial fusion, as well as smoothing of transverse inhomogeneities at a critical point under the interaction of a laser pulse with an inhomogeneous plasma in inertial fusion; in addition, parameters were found for a plasma lens that would allow the sequences of relativistic positron bunches to focus uniformly. An important issue was the study of the amplitude of the wakefield and the transformer ratio for excitation of

wakefield by the sequence of charged particle bunches (beams) in plasma and dielectric. Excitation of the field in the plasma by a sequence of electron bunches in the non-resonant case was investigated. The process of combined laser-plasma acceleration is considered, thanks to which it is possible to ensure energy transfer between self-injected bunches and the wake wave. The method of restoring the phase synchronization of laser pulses and the wake wave is studied, as well as the influence of the external magnetic field on the electron bunches that excite the wakefield. The studies described above are connected by the question of excitation of the wake field by X-ray laser pulses under the condition of plasma density equal to the density of free electrons in metals. Together with the use of X-ray laser pulses, the use of plasma with such parameters allows the excitation of wakefields with an amplitude of several (in the study of about 2-4 and more) teravolts per meter. It was shown that under these conditions the wakefield process is accompanied by the formation of self-injected electron bunches in the region of significant negative space charge as well as regions with high ions density as well as formation of regions with increased ion density, which provides a significant acceleration field. As a result, self-injected bunches can be accelerated in a significant electric field. It was found that for different parameters of laser pulses, the amplitude of the longitudinal wakefield acceleration can reach a teravolt per meter. The self-injected bunches move along the wake bubble without breaking for 100 laser periods. In addition, the so-called combined laser-plasma acceleration mode is observed. This mode allows to save the energy of the laser pulse, which is destroyed during propagation in the plasma. The energy of the laser pulse is transmitted to the self-injected bunches when the bunches enter the acceleration phase, then, when the bunches are in the phases of deceleration of the wake wave, their energy is transmitted to the wave and the wave accelerates subsequent self-injected bunches. This increases the amplitude of the acceleration field and, as a consequence, improves the efficiency of the process. The next question of the study is the process of coherent addition of accelerating fields after laser pulses in the chain. The method of the acceleration fields addition after laser pulses in the linear case is well known: if the laser pulses are the same, the

acceleration fields after them are correlated as $A_1:A_2:A_3 = 1:2:3$, where the indices i are used to denote the laser pulse number, A_i – is the amplitude. In the nonlinear case, the coherent assembly is broken, the laser pulses can fall into the phase of acceleration of the wake wave. Unlike the previous problem, this is a negative effect – the energy of the wave is lost. One of the ways to solve this problem is the so-called “adjustment” (or “tuning”). The mechanism of “adjustment” was investigated by the authors and presented in the results of the study. Thanks to it, it was possible to partially restore the mechanism of coherent addition in the nonlinear case. After the last laser pulse of the sequence, which entered the phase of deceleration of the wake wave, there was an increase in the amplitude of the acceleration field using the "adjustment". During the study, the effect of increasing the amplitude of the wakefield after laser pulses was investigated. It was found that the amplitude of the accelerating field can be up to 6 times the value of the amplitude of the accelerating field after the first laser pulse.

The use of inhomogeneous plasma to support the acceleration process of the self-injected bunch and increase the accelerating gradient was studied. The author of dissertation considers a method of increasing the density of plasma electrons, which leads to a dynamic decrease in the size of the wakefield bubble along which the electron beam moves.

The issue of finding parameters to ensure the smallest possible spatial and energy scatter of self-injected bunches was studied. The profiling mechanism is used. The use of this mechanism allowed to obtain a self-injected bunch, the spatial size of which is several times smaller than the size of the wake bubble. The spatial and energetic scattering of bunches, emittance was studied. The obtained values are minimal and allow the use of bunches in further studies in the case of experimental implementation of the mechanism. The experiments on wakefield acceleration are already underway, increasing in rate and scale in projects such as EuPRAXIA.

The studies described above are combined by the question of excitation of the wake field by X-ray laser pulses in a plasma with a density equal to the density of free electrons in metals. This study, currently considered as promising. To realize

such a rate of acceleration, lasers with parameters that can be achieved theoretically and are currently being studied are needed.

In addition, the tasks studied involve scaling – this is explained in more detail in the text of the sections. As is well known, reducing the physical size of accelerators along with increasing their efficiency (acceleration rates) is an urgent need. Moreover, the now known dielectric and metal structures due to the physical phenomenon of electrical breakdown do not allow to obtain accelerating gradients larger than 100 MeV per meter (in some cases up to 40 GeV per meter under special conditions, such as in a capillary). Therefore, wake acceleration in plasma allows you to solve two tasks at once and create a compact and efficient new type accelerator for charged particles.

Positron bunches focusing is necessary in any modern electron-positron collider. In the current work, a plasma lens for focusing beams is studied, which allows to focus sequences of relativistic positron bunches uniformly. There are different configurations of plasma lenses. They are investigated by numerical simulation. All cases are obtained for Gaussian distribution (in the cosine approximation) bunches according to the distance between them and the charge ratio. The lengths of the bunches were chosen to be equal to $L_b = \lambda/2$. It has been shown that the beams focus with the same forces, and the centers of the beams focus worse than their fronts. Among the cases, we considered the case of a profiled sequence of bunches, for which the current of the first 5 bunches is equal to $2k - 1$, $k \leq N$, $N = 5$. The study is new and relevant, because the focusing of positrons is a rather difficult task, because the positron bunches attract plasma electrons. Because of this, the focusing force is inhomogeneous. For considered system parameters, the study presents a homogeneous focusing of a sequence of relativistic bunches. The results of the study can be put into practice with the appropriate result of focusing.

The study of the amplitude of the wakefield and the transformer ratio for the excitation of wakefield by the sequence of charged particles bunches in plasma and dielectric were performed. The excitation of the wakefield by a sequence of bunches

of charged particles in a dielectric resonator is investigated in this work. Numerical simulation of injection of bunches of charged particles (electrons) into a dielectric resonator (a dielectric rod with a metal casing) and excitation of a wakefield is performed. It is known that the maximum value of the transformer ratio TR , equal to (in the simplified case) the ratio of the maximum accelerating field after the bunch to the maximum decelerating field in the middle of the bunch is $TR = 2$ for one bunch. It was shown that in the case of injection of a sequence of bunches with certain parameters, in particular, with a length equal to 0.5λ of the wavelength, it is possible to obtain the value of the transformer ratio $TR = 2N$, where N is the number of bunches.

By using two-dimensional numerical simulation, the evolution of focusing force acting on electron bunches during their propagation in plasma has been investigated in dependence on the bunch length and distance between bunches for various current profiles of the bunch.

The mechanism for the sequence of long relativistic electron bunches, that leads to resonant excitation of the wakefield even in cases where the frequency of injection of bunches differs from the plasma frequency, has been studied.

In this case, some of the bunches that fall into the defocusing phases are lost. Due to this process, synchronization is restored. However, at the same time, defocused bunches participate in the excitation of the wakefield. With a relatively small magnetic field (can be provided with permanent magnets), it is possible to return the bunches to the axis of the system in the desired phases, restoring synchronization. The returned bunches support the resonant excitation of the wakefield.

During the study, a numerical simulation of the excitation of a nonlinear wake wave in plasma was performed by a relativistic electron bunch with a charge density that increases according to Gauss's law and then decreases to 0.

The dependence of the transformer ratio and the maximum accelerating field on the length of the bunch with a constant charge of the bunch is investigated. It was

found that the length of the bunch $7\lambda/4$ in the nonlinear case is optimal. With it, the transformer ratio $TR \approx 6$ can be achieved (due to shaping of long bunch and nonlinearity). Increasing the transformer ratio leads to an improvement in the excitation efficiency of the wakefield.

The dependence of the radial force on the length of the bunches and the distance between the bunches was also studied. The case of bunches with a uniform current distribution along the bunch was considered, as well as a bunches with an current increase. Thus, the results of the study can be implemented in practice by solving the difficulties that arise in the laboratory associated with the processes described in the problems. The results presented in the dissertation in one way or another increase the efficiency of charged particle accelerators: allow to make them more compact and increase the accelerating gradients.

Keywords: numerical simulation, wakefield, magnetic field, electric field, plasma, plasma lens for focusing beams, dielectric rod, transformer ratio, Gaussian distributions, electron beam, ions density, PIC calculation method, Maxwell equations, energy of the particles, laser.