

Пучково–плазменная неустойчивость в заряженной электронной плазме в отсутствие ионов

А. Е. Дубинов^{1,2,*}, А. Г. Петрик^{3,†}, С. А. Куркин^{4,3,‡}, Н. С. Фролов^{3,4,§}, А. А. Короновский^{4,3,¶}, А. Е. Храмов^{3,4,**}

¹Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики. Россия, 607188, Саров, пр. Мира, 37

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. Россия, 607186, Саров, ул. Духова, 6

³Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Институт электронной техники и машиностроения, кафедра «Автоматизация, управление, мехатроника». Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

⁴Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра электроники, колебаний и волн Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

Был изучен новый нелинейный феномен физики плазмы — пучково-плазменная неустойчивость в заряженной электронной плазме в отсутствие ионов. Показана возможность развития неустойчивости и проанализированы характеристики физических процессов, происходящих при взаимодействии электронного пучка с плазмой.

PACS: 52.40.Mj

УДК: 533.922

Ключевые слова: сжатое состояние пучка, ССП, релятивистский электронный пучок, пучково–плазменная неустойчивость.

Пучково-плазменная неустойчивость (ППН) — важное фундаментальное явление, исследованию и многочисленным применениям которого посвящено большое число научных трудов. Данное явление открыто независимо Александром И. Ахиезером и Яковом Б. Файнбергом, а также David J. Bohm и Eugene P. Gross [1, 2].

ППН заключается в раскачке продольных электронных колебаний в плазме при пропускании сквозь нее электронного пучка. На линейной стадии ППН ее инкремент пропорционален производной функции распределения электронов по скорости в точке синхронизма волны с электронами пучка. Квазилинейная теория взаимодействия, построенная в работах [3–5], дает представление о том, как эволюционирует суммарная функция распределения электронов пучка и плазмы (СФРЭ) в неустойчивости: провал между максимумами СФРЭ, которые соответствуют плазменным и пучковым электронам, постепенно сглаживается диффузионным образом. На нелинейной стадии ППН в плазме возникает сильно-турбулентное состояние с генерацией уединенных когерентных структур типа солитон [6] или фазовый вихрь [7]. Обширные обзоры результатов теоретического анализа и численного моделирования всех стадий ППН представлены в работах [8, 9]. ППН используется в пучково-плазменных СВЧ-генераторах и усилителях [10–12], а также для

возбуждения пучково-плазменных разрядов для технологий [13, 14].

Считается, что для развития ППН обязательно необходим неподвижный ионный фон, обеспечивающий квазинейтральность плазменно–пучковой системе и возникновение возвращающей силы, действующей на отклоненные от положения равновесия плазменные электроны. Мы задались вопросом формирования ППН в случае, если электронный пучок инжектировать в неподвижную однокомпонентную горячую электронную плазму без ионов, например, удерживаемую в ловушке или созданную каким-либо другим способом.

Целью данной работы является PIC-моделирование развития ППН при инъекции электронного пучка в однокомпонентную горячую электронную плазму без ионов. В качестве такой плазмы было выбрано так называемое сжатое состояние электронного пучка (ССП).

Впервые ССП было обнаружено в магнитоизолированных виркаторах в [15]. Феномен ССП в виркаторах заключается в следующем. Сразу же после начала отражения электронов от виртуального катода (ВК) в потенциальной яме между реальным и виртуальным катодом устанавливается двухпоточковое состояние пучков встречных электронных потоков. Встречные пучки электронов в невозмущенном виде долго находиться не могут, и возбуждается двухпоточковая неустойчивость. Однако во встречных пучках с током, превышающим критический, существует более быстрая неустойчивость, опережающая в своем развитии двухпоточковую, а именно, формирование плотного горячего облака заряженной электронной плазмы, характеризующейся большой плотностью электронов и развитой турбулентностью. Фактически, ССП можно охарактер-

*E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

†E-mail: a.g.petrlik@gmail.com

‡E-mail: kurkinsa@gmail.com

§E-mail: phrolovns@gmail.com

¶E-mail: alexey.koronovskii@gmail.com

**E-mail: hramovae@gmail.com

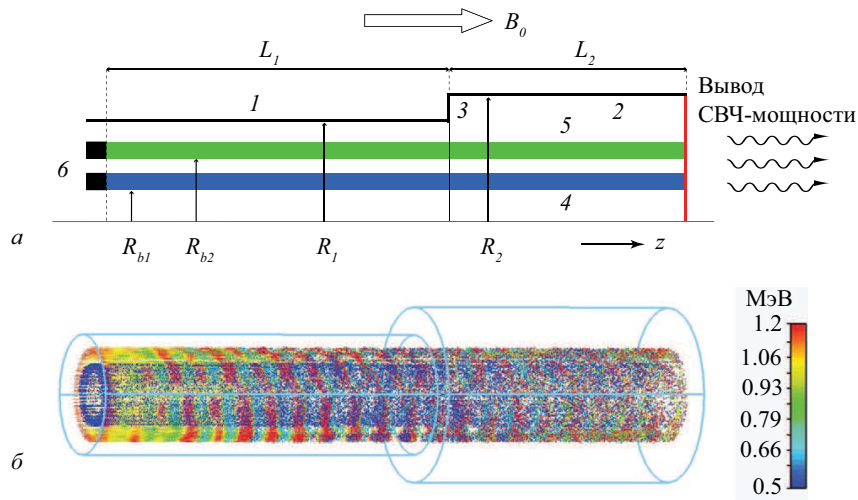


Рис. 1: Схематическое изображение исследуемой системы (а) и его реализация в качестве 3D-модели в CSTParticleStudio в режиме пучково-плазменной неустойчивости (б)

ризовать как распределенный в пространстве дрейфа ВК. Явление ССП легко наблюдать по профилю фазового портрета, когда встречные пучки смыкаются вдоль оси скоростей, образуя область сильно нагретого электронного облака.

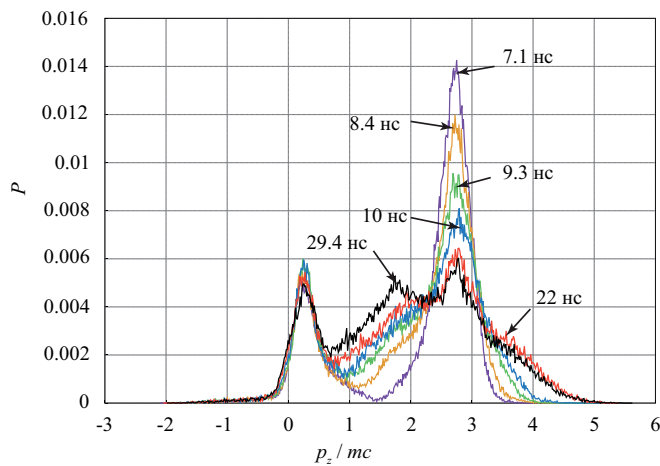


Рис. 2: Эволюция распределения частиц по скоростям

Схема исследуемого виркатора представлена на рис. 1а. Система состоит из двух соосных трубок $L_1 = 90$ мм и $L_2 = 70$ мм, данные трубки имеют различный радиус $R_1 = 15$ мм, $R_2 = 22$ мм. Два цилиндрических электронных пучка (4 и 5 на рис. 1а) имеют внутренний радиус $R_{b1} = 6$ мм и $R_{b2} = 10$ мм соответственно, толщина пучков $\Delta = 2$ мм. Первый пучок имеет следующие параметры: $I_1 = 1.5$ кА, $U_1 = 1.2$ МэВ, а второй пучок: $I_2 = 15$ кА, $U_2 = 0.4$ МэВ. Вся система находится в продольном магнитном поле $B_0 = 5$ Т.

Второй пучок имеет меньшую энергию, и он формирует ССП — однокомпонентную плазму, которая играет роль активной среды в образовании ППН. Пер-

вый высокоэнергетический пучок дрейфует вдоль ССП и возбуждает высокочастотные волны пространственного заряда. Возбужденные волны пространственного заряда можно отчетливо видеть на рис. 1б. Также необходимо отметить, что эти волны имеют вихревую структуру за счет вращения в магнитном поле.

В результате численного моделирования были получены детальные характеристики физических процессов, происходящих при взаимодействии двух пучков. Показательна эволюция функции распределения электронов, суммарной для ССП и дополнительного пучка. Пример такой эволюции показан на рис. 2. Видно, что функция распределения стремится сгладить провал между ССП и дополнительным пучком. Такое поведение функции распределения типично для процесса релаксации электронного пучка при ППН в электронно-ионной плазме [16, 17].

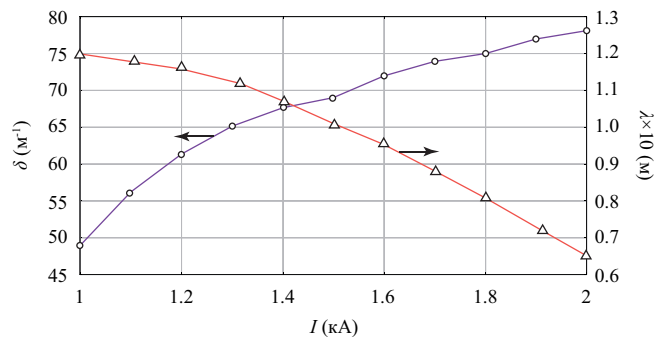


Рис. 3: Зависимость инкремента неустойчивости δ и длины волны λ от тока I пучка

Анализируя фазовые портреты первого пучка, можно получить длину волны, возбуждаемой в нем, а также пространственный инкремент неустойчивости. На рис. 3 показан график зависимостей длины волны

и инкремента от тока первого пучка. Увеличение тока пучка приводит к образованию вихревых волн с более высокой частотой, длина волны уменьшается, а инкремент нарастает — неустойчивость развивается быстрее.

Таким образом для реализации электронной плазмы без ионов была использована идея формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в магнитоизолированном двухсекционном вилкато-

ре. Была показана возможность развития пучково-плазменной неустойчивости в системе с электронным пучком и неподвижной однокомпонентной горячей электронной плазмой без ионов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-32-20299, № 15-52-04018). Н.С. Фролов выражает благодарность РФФИ (грант № 16-32-60107) за индивидуальную поддержку научных исследований.

-
- [1] Ахиезер А.И., Файнберг Я.Б. ДАН СССР. **69**. С. 555. (1949).
- [2] Bohm D., Gross E. Phys. Rev. **75**, № 11. P. 1864. (1949).
- [3] Romanov Y.A., Filippov G.F. Sov. Phys. JETP. **13**. P. 87. (1961).
- [4] Веденов А.А., Велихов Е.П., Сагдеев Р.З. УФН. **73**. С. 701. (1961).
- [5] Shapiro V.D., Shevchenko V.I. Sov. Phys. JETP. **27**. P. 635. (1968).
- [6] Fedorchenko V.D. JETP Lett. **18**. P. 281. (1973).
- [7] Eliasson B., Shukla P.K., Dieckmann M.E. Plasma Phys. Control. Fusion. **48**. P. 257. (2006).
- [8] de Jager P.C., Sluijter F.W., Hopman H.J. Phys. Reports. **167**. P. 177. (1988).
- [9] Bret A., Gremillet L., Dieckmann M.E. Phys. Plasmas. **17**. P. 120501. (2010).
- [10] Богданкевич Л.С., Кузелев М.В., Рухадзе А.А. УФН. **133**. С. 3. (1981).
- [11] Kuzelev M.V. Sov. Phys. JETP. **56**. P. 780. (1982).
- [12] Bogdankevich L., Ivanov I.E., Strelkov P.S. Plasma Phys. Reports. **36**. P. 762. (2010).
- [13] Berezin A.K. Sov. J. Atomic Energy. **11**. P. 1143. (1962).
- [14] Walton S.G. Surface & Coating Techn. **186**. P. 40. (2004).
- [15] Ignatov A.M., Tarakanov V.P. Phys. Plasmas. **1**. P. 741. (1994).
- [16] Tarakanov V.P., Shustin E.G. Plasma Phys. Reports. **33**. P. 130. (2007).
- [17] Ratcliffe H. Phys. Plasmas. **21**. P. 122104. (2014).

Investigation of beam-plasma instability in charged plasma in the absence of ions

A. E. Dubinov^{1,2,a}, A. G. Petrik^{3,b}, S. A. Kurkin^{4,3,c}, N. S. Frolov^{3,4,d}, A. A. Koronovskii^{4,3,e}, A. E. Hramov^{3,4,f}

¹Russian Federal Nuclear Center — All-Russia Scientific and Research Institute of Experimental Physics
Sarov 607188, Russia

²Sarov State Institute of Physics and Technology (SarFTI) of National Research Nuclear University «MEPhI»
Sarov 607186, Russia

³Automation, Control, Mechatronics Department, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu. A.
Saratov 410054, Russia

⁴Faculty of Nonlinear Processes, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky
Saratov 410012, Russia E-mail: ^adubinov-ae@yandex.ru, ^ba.g.petrik@gmail.com, ^ckurkinsa@gmail.com,
^dphrolovns@gmail.com, ^ealexey.koronovskii@gmail.com, ^fhramovae@gmail.com

In the present work we have studied the novel nonlinear phenomenon of plasma physics — beam-plasma instability in a charged plasma in the absence of ions. We have shown the possibility of the instability development and analyzed the characteristics of physical processes taking place during the beam-plasma interaction.

PACS: 52.40.Mj.

Keywords: squeezed state of electron beam, SSB, relativistic electron beam, beam-plasma instability.

Сведения об авторах

1. Дубинов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (452) 99-85-47, e-mail: dubinov-ae@yandex.ru.
2. Петрик Алексей Георгиевич — аспирант; тел.: (452) 99-85-47, e-mail: a.g.petrik@gmail.com.
3. Куркин Семен Андреевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (452) 51-42-94, e-mail: kurkinsa@gmail.com.
4. Фролов Никита Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (452) 99-85-47, e-mail: phrolovns@gmail.com.
5. Короновский Алексей Александрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе; тел.: (452) 51-42-94, e-mail: Alexey.koronovskii@gmail.com.
6. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (452) 99-85-47, e-mail: hramovae@gmail.com.