

2D3V ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМЕ

К.В. Лотов¹, В.И. Маслов, И.Н. Онищенко, М.С. Весновская²

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина;*

¹ИЯФ им. Будкера и НГУ, Новосибирск, Россия;

*²Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина
E-mail: vmaslov@kipt.kharkov.ua*

Рассматривается новый механизм возникновения пучково-плазменной неустойчивости, обусловленный, из-за различия продольной и поперечной масс релятивистских электронов, не продольной модуляцией цилиндрического релятивистского электронного пучка в плазме, а его разбиением на сгустки за счет дефокусировки электронов радиальным полем возбуждаемой волны и ухода их из области взаимодействия с волной. Проведено 2d3v-моделирование модуляции непрерывного пучка на этом механизме и нарастание возбуждаемого поля плазменной волны. Исследовано формирование последовательности релятивистских электронных сгустков из плотного непрерывного пучка. Показана также возможность получения профилированной последовательности сгустков из длинного электронного сгустка с линейно нарастающей плотностью.

1. ВВЕДЕНИЕ

При развитии пучково-плазменной неустойчивости [1] пучок заряженных частиц испытывает продольную модуляцию. Это используется для приготовления последовательности электронных сгустков. Так в [2] рассмотрено формирование последовательности электронных сгустков вследствие продольной модуляции длинного электронного сгустка с целью их использования для возбуждения кильватерных полей в плазме.

Для радиально ограниченных пучков существенной является двумерная динамика частиц пучка (фокусировка/дефокусировка), которая также может приводить к модуляции пучка и развитию пучково-плазменной неустойчивости, что до сих пор не исследовалось. Действительно, при большом релятивистском факторе пучка $\gamma_b \gg 1$ поперечная масса частиц пучка существенно меньше их продольной массы, $m_{er} = m_0 \gamma_b \ll m_{ez} = m_0 \gamma_b^3$, так что продольная динамика электронных сгустков «заморожена» по сравнению с их поперечной динамикой. В результате преобладающим является поперечное движение электронов, приводящее к уходу дефокусируемых электронов из области взаимодействия с волной и к модуляции пучка. Самосогласованный рост амплитуды возбуждаемой волны и глубины модуляции пучка характеризует развитие пучково-плазменной неустойчивости, аналогичной [1]. Отметим, что различие продольной и поперечной масс релятивистского электрона существенно сказывается на развитии классической пучково-плазменной неустойчивости – инкремент неустойчивости максимален для косой волны, что приводит к поперечному разбросу импульсов электронов и изменению характера энергообмена пучка с волной [3]. В двумерной задаче о неустойчивости радиально ограниченного

пучка в безграничной плазме [4-6] радиус пучка предполагается неизменным, что исключает рассматриваемую здесь модуляцию пучка в результате его ухода из областей радиальной дефокусировки. Неустойчивость радиально ограниченного пучка в плазме с изменяющимся радиусом пучка аналитически исследована в [7]. Модуляция длинного ионного сгустка исследована аналитически и с помощью численного моделирования в [8].

В этой статье представлены результаты 2d3v численного моделирования кодом LCODE [9] развития пучково-плазменной неустойчивости, обусловленной из-за различия продольной и поперечной масс электронов модуляцией цилиндрического релятивистского электронного пучка в плазме за счет дефокусировки электронов радиальным полем возбуждаемой волны.

Как и в [2], рассматриваемый механизм модуляции пучка может быть использован для решения важной проблемы [2, 10, 11] – формирования последовательности электронных сгустков в кильватерном методе ускорения заряженных частиц. Поперечно-продольная динамика сгустков последовательности при возбуждении кильватерных полей в плазме численно моделировалась нами в [12].

Ниже приведены результаты моделирования формирования последовательности электронных сгустков из непрерывного пучка малой плотности, из плотного пучка и формирование цепочки сгустков, плотности которых растут вдоль цепочки, из длинного профилированного сгустка с линейно нарастающей плотностью.

Представлены также результаты численного моделирования возбуждения кильватерных электронных полостей последовательностью электронных сгустков. Обнаружено, что кильватерная полость может быть возбуждена не только интенсивным сгу-

стком, но и цепочкой сгустков небольших плотностей.

Рассмотрена возможность использования последовательности возбужденных полостей для ускорения последовательности электронных сгустков. Найдена разность частоты следования сгустков и частоты следования кильватерных полостей, при которой N-1 драйверных сгустков усиливают цепочку кильватерных полостей, а N-й сгусток попадает в максимальное ускоряющее поле N-1 полости.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ

Рассмотрим приготовление цепочки электронных сгустков радиальной фокусировкой и дефокусировкой непрерывного пучка. Используя код LCODE [9], моделируем неустойчивость непрерывного пучка релятивистских электронов за счет ради-

альной фокусировки и дефокусировки, то есть, моделируем приготовление цепочки сгустков фокусировкой и дефокусировкой непрерывного пучка. Необходимо отметить, что при использовании релятивистского электронного пучка продольная динамика электронов очень медленная, а именно, электроны на рассматриваемых временах не имеют возможности существенно сдвигаться в продольном направлении. По радиусу пучок имеет гауссовский профиль.

2.1. ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В СЛУЧАЕ ПУЧКА МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ

Рассмотрим взаимодействие с плазмой, плотность которой равна $n_p=10^{11} \text{ см}^{-3}$, пучка, релятивистский фактор которого равен $\gamma_b=5$, радиус $\sigma_r=0,3c/\omega_p$, ток $I_b=0,13 \cdot 10^{-3} \text{ мс}^3/4e$. Здесь ω_p – плазменная частота электронов. Из Рис.1 видно, что после некоторого времени ($60\omega_p^{-1}$) формируется цепочка сгустков.

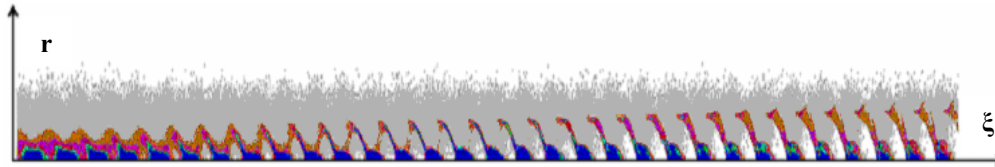


Рис.1. Пространственное ($r, \xi=z-ct$) распределение плотности пучка электронов после формирования сгустков

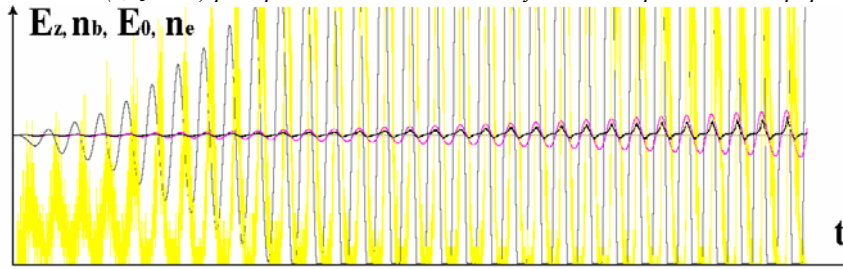


Рис.2. Плотность электронов пучка вблизи оси (желтый цвет), продольное кильватерное электрическое поле E_z вблизи оси (красный), коэффициент связи электронов пучка с E_z (черный), плотность электронов плазмы вблизи оси (серый)

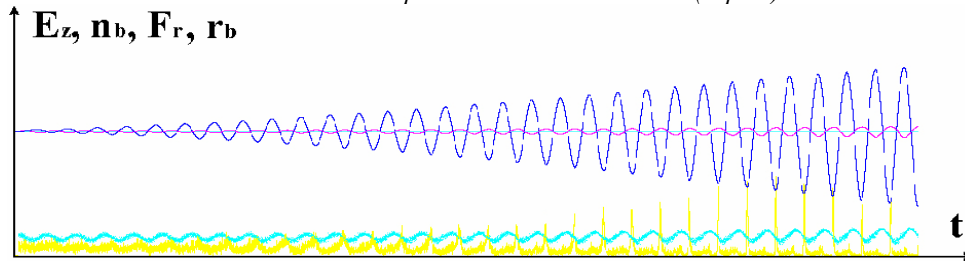


Рис.3. Плотность электронов пучка на радиусе, равном радиусу пучка (желтый цвет), продольное кильватерное поле E_z на радиусе, равном радиусу пучка (красный), радиальная сила (синий), средний радиус пучка (голубой)

Плотность формируемых сгустков электронов больше, чем начальная плотность пучка вследствие фокусировки.

Плотность электронного пучка больше вблизи оси в тормозящих фазах, чем в ускоряющих. Тогда соответственно коэффициент связи электронов пучка с E_z больше в тормозящих фазах, чем в ускоряющих (Рис.2). Из Рис.3 также видно, что средние радиусы электронов пучка меньше в тормозящих фазах, чем в ускоряющих. Энергия пучка, потраченная на разбивку непрерывного пучка в последовательность сгустков, небольшая.

2.2. ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В СЛУЧАЕ ПРОФИЛИРОВАННОГО ПУЧКА

Рассмотрим превращение длинного электронного сгустка (релятивистский фактор $\gamma_b=5$, радиус $\sigma_r=0,3c/\omega_p$, ток $I_b=0,3 \cdot 10^{-3} \text{ мс}^3/4e$) с плотностью, линейно нарастающей в продольном направлении вдоль оси сгустка, в профилированный последовательность сгустков за счет фокусировки и дефокусировки. Из Рис.4 видно, что по прошествии некоторого времени ($80\omega_p^{-1}$) формируется последовательность сгустков.

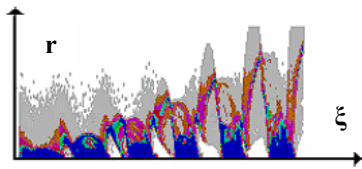


Рис.4. Пространственное (r, ξ) распределение плотности формируемой последовательности электронных сгустков

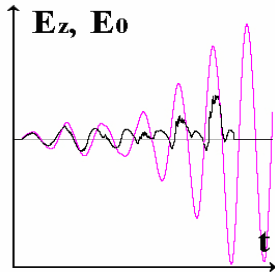


Рис.5. Продольное кильватерное поле E_z вблизи оси (красный цвет) и коэффициент связи электронов пучка с E_z (черный)

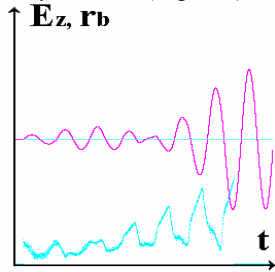


Рис. 6. Продольное кильватерное поле E_z на радиусе, равном радиусу пучка, средний радиус пучка

Из Рис.5 видно, что связь электронов пучка с продольным электрическим кильватерным полем лучше (хуже) в тормозящих (ускоряющих) фазах. Из Рис.6 видно, что средние радиусы сгустков меньше (больше) в тормозящих (ускоряющих) фазах. Эти результаты способствуют развитию неустойчивости формирования последовательности электронных сгустков.

2.3. ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В СЛУЧАЕ ПУЧКА БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

Рассмотрим формирование последовательности электронных сгустков в результате радиальной фокусировки и дефокусировки плотного непрерывного пучка электронов (с током $I_b=0,15\text{mc}^3/4e$, радиусом $\sigma_r=0,3c/\omega_p$, релятивистским фактором $\gamma_b=1000$) при формировании цепочки кильватерных полостей (исследования полостей посвящены, в частности, работы [13-16]). Сначала формируется гофрированный канал (т.е. гофрированная полость электронов), а потом (на временах $381\omega_p^{-1}$) формируется цепочка полостей (Рис.7).

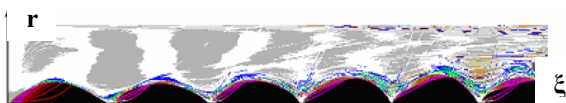


Рис.7. Пространственное (r, ξ) распределение плотности электронов плазмы в поле цепочки полостей

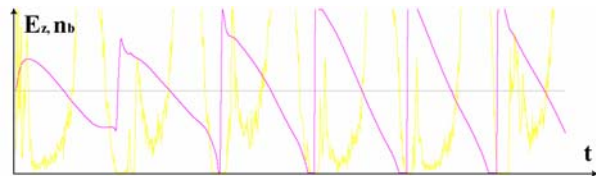


Рис.8. Продольное распределение (вдоль оси) плотности электронных сгустков и продольного кильватерного поля

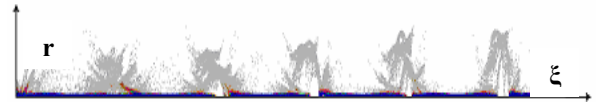


Рис.9. Последовательность плотных релятивистских сгустков электронов, формируемых из непрерывного пучка за счет фокусировки и дефокусировки электронов при взаимодействии с плазмой

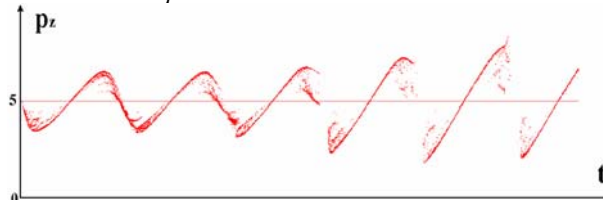


Рис.10. Продольные импульсы сгустков при возбуждении ими цепочки полостей электронов плазмы

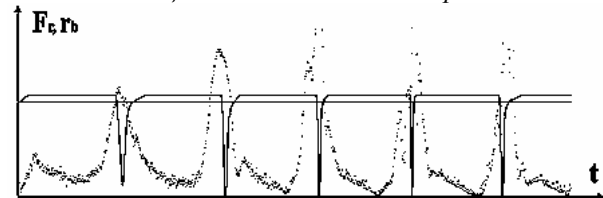


Рис.11. Пространственное распределение средних радиусов сгустков электронов и радиальной силы, действующей на плотный электронный пучок при его взаимодействии с плазмой

Плотности формируемых сгустков электронов (Рис.8,9) больше, чем начальная плотность пучка вследствие фокусировки. После формирования последовательности сгустков наблюдаются на больших временах бетатронные колебания, не синхронные вдоль оси полости. Передние фронты сгустков тормозятся, а их задние фронты ускоряются (Рис.10). Последнее обеспечивает фазовую стабильность сгустков. Последовательность сгустков формируется из непрерывного пучка, поскольку пространственное распределение радиальной силы, действующей на электроны, имеет вид, показанный на Рис.11. Видно, что радиальная сила почти не зависит $F_r \approx \text{const}$ от продольной координаты z внутри полостей.

Далее полученные сгустки могут быть улучшены для дальнейшего использования современными механизмами компрессии.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЦЕПОЧКИ КИЛЬВАТЕРНЫХ ПОЛОСТЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ПЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Рассмотрим результаты численного моделирования кинетическим кодом LCODE [8, 15] возбуждения электронных кильватерных полостей плотными

электронными сгустками. Вследствие специфической динамики электронов плазмы в окрестности укручения, которое необходимо для эффективного ускорения электронов, формируется неустрашимый кильватер за полостью, то есть в следе за первой полостью имеются возмущения с довольно большими полями, которые было бы полезно усилить и использовать для ускорения. Следовательно, рассмотрим возможность усиления этого кильватера и возбуждение семи полостей последовательностью из четырех плотных сгустков (Рис.12, 13). Мы выбрали параметры так, что частота следования возбуждаемых полостей в два раза больше частоты следования сгустков. В этом случае следующий сгусток не влияет на динамику электронов плазмы в окрестности укручения поля полости, сформированной предыдущим сгустком (см. Рис.12, 13). Сгустки фокусируются полостями (см. Рис.12).

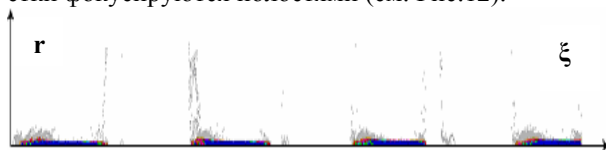


Рис.12. Пространственное (r, ξ) распределение плотности четырех сгустков после фокусировки полостями



Рис.13. Семь кильватерных полостей, возбуждаемых последовательностью четырех сгустков

Покажем, что плотность сгустков не очень большая, то последовательность $N-1$ сгустков-драйверов не формирует полости, но она может появиться после N -го сгустка. Действительно, на Рис.14 видно, что полость появляется после шестого сгустка.

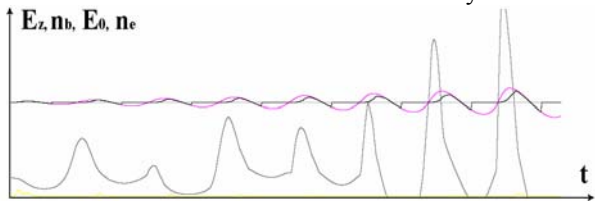


Рис.14. Распределение плотности электронов плазмы (серая кривая) вдоль оси продольной координаты z при взаимодействии с последовательностью релятивистских электронных сгустков

Рассмотрим случай оптимальной нерезонансной последовательности сгустков. Существует оптимальная разность частот следования сгустков и следования кильватерных полостей, так что $N-1$ сгустков-драйверов усиливают цепочку кильватерных полостей, а передний фронт N -го сгустка попадает в максимальное ускоряющее кильватерное поле. Если частота следования сгустков немного больше частоты следования полостей $\omega_m > \omega_p$, тогда передний фронт N -го сгустка проникает сквозь укручение. N -й сгусток разделяется на две части той частью, которая попадает в укручение, поскольку эта часть дефокусируется. Передняя отделившаяся часть

(Рис.16) этого сгустка ускоряется, а задняя – тормозится (Рис.16). Таким образом, с помощью нерезонансной последовательности можно контролировать ускорение электронов.

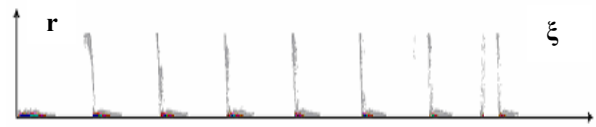


Рис.15. Пространственное (r, ξ) распределение плотности восьми нерезонансных сгустков при их взаимодействии с цепочкой кильватерных полостей

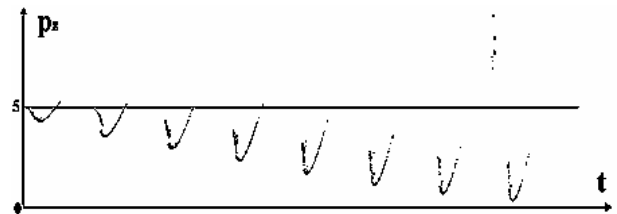


Рис.16. Продольный фазовый портрет восьми сгустков при их взаимодействии с цепочкой кильватерных полостей

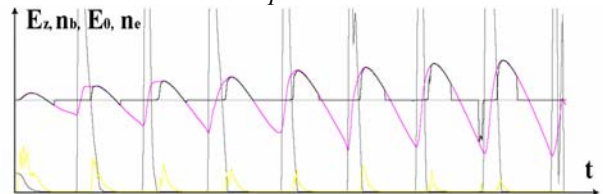


Рис.17. Распределение кильватерного поля, плотностей электронов плазмы и пучка вдоль оси продольной координаты z при взаимодействии последовательности из восьми релятивистских электронных сгустков с восемью кильватерными полостями

Видно (Рис.17), что передний фронт 8-го сгустка попадает в максимальное ускоряющее кильватерное поле.

ВЫВОДЫ

С помощью 2d3v кода исследован новый тип неустойчивости релятивистского электронного пучка в плазме, вызванной модуляцией цилиндрического пучка конечного радиуса за счет ухода из области взаимодействия с волной электронов, находящихся в дефокусирующих фазах радиального поля возбуждаемой волны. Из-за различия продольной и поперечной масс релятивистских электронов неустойчивость обусловлена радиальной динамикой электронного пучка. Рассмотрено формирование последовательности релятивистских электронных сгустков непрерывного пучка малой и большой плотности. Показана также возможность получения профилированной последовательности сгустков из длинного электронного сгустка с линейно нарастающей плотностью.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 08-01-00622 и 09-02-00594, грантом президента РФ МД-2995.2009.2 и грантом Рособразования 2.1.1/3983.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.I. Akhiezer, Ya.B. Fainberg. About interaction of charged particle beam with electron plasma // *DAN SSSR*. 1949, v.69, №4, p.555-556.
2. V.A. Balakirev, G.V. Sotnikov, Ya.B. Fainberg. Modulation of relativistic electron bunches in plasma // *Phys. Plasmas. Rep.* 1996, v.22, №2, p.165-169.
3. Ya.B. Fainberg, V.D. Shapiro, V.I. Shevchenko. On nonlinear theory of interaction with plasma of «monoenergy» relativistic electron beam // *ЖТФ*. 1969, т.57, №3(9), с.966-977.
4. О.Н. Азарова, А.А. Иванов, Т.К. Соболева. Об устойчивости плоских электронных пучков в пространственно ограниченной плазме // *Физика плазмы*. 1979, т.5, в.3, с.639-649.
5. О.Н. Азарова, А.А. Иванов, Г.Б. Левадный. Влияние поперечных размеров электронного пучка на пучково-плазменную неустойчивость // *ДАН СССР*. 1983, т.269, №1, с.93-97.
6. А.А. Иванов, Н.Г. Попков. О плазменно-пучковой неустойчивости ограниченного электронного пучка в слабом магнитном поле // *Физика плазмы*. 1984, т.10, в.1, с.106-111.
7. В.Б. Красовицкий. Возбуждение регулярных поперечных плазменных колебаний конечной амплитуды ограниченным релятивистским пучком электронов // *Физика плазмы*. 1977, т.3, с.105.
8. N. Kumar, A. Pukhov, K. Lotov, A. Caldwell, G. Xia. Self-modulation instability of a long proton bunch in plasmas // *Phys. Rev. Let.* 2010 (in publ.).
9. K.V. Lotov. Simulation of ultrarelativistic beam dynamics in plasma wake-field accelerator // *Phys. Plasmas*. 1998, v.5, №3, p.785-791.
10. P. Muggli, V. Yakimenko, J. Park, E. Kallos, K. Kusche, M. Babzien. A mask technique for the generation of trains or microbunches with subpicosecond spacing and length // *Proc. of the 2008 Advanced Accelerator Concepts Workshop*. Santa Cruz, CA, 2008.
11. P. Muggli, E. Kallos, V. Yakimenko, M. Babzien, K. Kusche, W. Kimura. Generation and Characterization of the Microbunched Beams with a Mesh Target // *Proc. of the 2007 IEEE Particle Accelerator Conf.* Albuquerque, NM. 2007, p.3073-3075.
12. K.V. Lotov, V.I. Maslov, I.N. Onishchenko, E. Svistun. Resonant excitation of plasma wakefields by a nonresonant train of short electron bunches // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2010, v.52, №6, p.065009.
13. A. Pukhov, S. Gordienko, S. Kiselev, I. Kostyukov. The bubble regime of laser-plasma acceleration: monoenergetic electrons and the scalability // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2004, v.46, p.B179-B186.
14. A. Pukhov, J. Meyer-ter-Vehn. Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime // *Appl. Phys.* 2002, v.B74, p.355-361.
15. С.В. Буланов, М. Ямагива, Т.Ж. Есиркепов и др. Ускорение электронного сгустка в режиме опрокидывания кильватерной волны // *Plasma Phys. Rep.* 2006, v.32, №4, p.291-310.
16. K.V. Lotov. Dynamics of plasma and beam electrons in wake-field acceleration devices // *Dr Sc Thesis*. 2005.

Статья поступила в редакцию 19.05.2010 г.

2D3V NUMERICAL SIMULATION OF INSTABILITY OF CYLINDRICAL RELATIVISTIC ELECTRON BEAM IN PLASMA

K.V. Lotov, V.I. Maslov, I.N. Onishchenko, M.S. Vesnovskaya

The new mechanism of origination of the beam-plasma instability is considered. It is conditioned, due to difference of longitudinal and transversal masses of relativistic electrons, not by longitudinal modulation of cylindrical relativistic electron beam in plasma but by its dividing on separate bunches due to defocusing of electrons by radial wakefield of excited wave and their leaving the region of interaction with wave. 2d3v simulation of modulation of continuous beam, caused by this mechanism, and growth of excited field of plasma wave is carried out. The formation of a sequence of relativistic electron bunches from dense continuous beam is investigated. The possibility of formation of shaped sequence of bunches from a long electron bunch with linear growing of density is shown.

2D3V ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТІЙКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЛЯТИВІСТСЬКОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА У ПЛАЗМІ

К.В. Лотов, В.І. Маслов, І.М. Оніщенко, М.С. Весновська

Розглядається новий механізм виникнення пучково-плазмової нестійкості, яка обумовлена, завдяки різниці повздовжньої та поперечної мас релятивістських електронів, не повздовжньою модуляцією циліндричного релятивістського електронного пучка в плазмі, а його розбивкою на згустки за рахунок дефокусування електронів радіальним полем хвилі, яка збуджується, і залишання ними області взаємодії з хвилею. Проведено 2d3v-моделювання модуляції безперервного пучка на цьому механізмі та зростання поля плазмової хвилі, яка збуджується. Досліджено формування послідовності релятивістських електронних згустків із щільного безперервного пучка. Показано також можливість отримання профільованої послідовності згустків з довгого електронного згустку з лінійно зростаючою щільністю.