

УДК 533.9.01

Компенсация объемного заряда ионного сгустка при прохождении через плазменный слой

В.Б. Красовицкий, В.А. Туриков

Проведено одномерное численное моделирование процесса прохождения ионного сгустка через плазменный слой. Исследовано явление компенсации заряда сгустка в таком взаимодействии. Показано, что происходит захват сгустком части электронов плазмы под действием суммарного поля разделения заряда. При этом наибольшее количество электронов захватывается на начальном этапе взаимодействия при входе сгустка в слой. Найдена зависимость степени компенсации заряда от параметров сгустка и плазменного слоя.

PACS: 52.40.Mj

Ключевые слова: ионные пучки, взаимодействие пучков с плазмой, заряженная плазма, компенсация заряда ионных пучков.

Введение

Известно, что пространственный заряд пучка приводит к его расплыванию вследствие кулоновского расталкивания. Поэтому проблема нейтрализации заряда интенсивных пучков является актуальной с самого начала их широкого использования в различных приложениях [1]. В последние годы важность этой задачи значительно возросла в связи с разработкой новых типов ускорителей высоких энергий [2, 3], а также в связи с использованием релятивистских пучков в системах инерциального термоядерного синтеза [4–6].

Существуют различные методы нейтрализации объемных зарядов пучков [1]. Один из наиболее эффективных способов основан на пропускании пучка через слой плазмы [7, 8]. В работах [9–12] теоретически и численно исследовался процесс прохождения ограниченного ионного импульса (сгустка) через плазму. При этом заряд сгустка считался полностью компенсированным после пересечения ее границы. Далее сгусток распространялся в плазме вместе с захваченными электронами, что приводило к развитию пучковой неустойчивости. Теоретически задача решалась в гидродинамическом приближении в предположении полной нейтрализации заряда и тока сгустка.

Целью данной работы являлось более детальное изучение процесса захвата электронов ионным сгустком на основе одномерного численного моделирования по методу частиц в ячейке. Такая упрощенная постановка задачи соответствует случаю пучка, у которого радиус сравним или превосходит продольную длину сгустка. Характерный масштаб возмущения электронной плотности плазмы под действием ионного сгустка имеет порядок V_b / ω_{pe} , где V_b – скорость сгустка, ω_{pe} – электронная плазменная частота. Поэтому при $V_b / \omega_{pe} \ll r_b$ (r_b – радиус сгустка) главный вклад в поле разделения заряда будет давать продольное поле E_z .

Гидродинамическое приближение

В экспериментах с интенсивными ионными пучками обычно предполагается, что тепловая скорость электронов плазмы намного меньше скорости пучков [7, 8]. Поэтому для аналитического описания таких процессов можно исходить из уравнений гидродинамики для холодной электронной жидкости:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla(n\mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{p} = e\mathbf{E} + \frac{e}{c}[\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}], \quad (2)$$

где \mathbf{v} и $\mathbf{p} = m\mathbf{v}(1 - \mathbf{v}^2/c^2)^{-1/2}$ – скорость и релятивистский импульс электронов.

В работах [9–12] уравнения (1) и (2) совместно с уравнениями Максвелла для электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{B} полей использованы для анализа условий полной компенсации заряда ионного сгустка при его взаимодействии с плазмой. Рассмотрено стационарное решение этих уравнений в системе отсчета сгустка, при котором вре-

Красовицкий Валерий Борисович, вед. научн. сотр., профессор.

Институт прикладной математики РАН
Россия, 125047, Москва, Миусская пл., 4.
Тел.: 330–49–17. E-mail: krasovit@mail.ru

Туриков Валерий Алексеевич, доцент.
Российский университет дружбы народов.
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.
Тел.: 491–55–90. E-mail: vturikov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10 июля 2013 г.

© Красовицкий В.Б., Туриков В.А., 2013

мя t и координата z вдоль направления скорости сгустка V_b входят во все выражения в комбинации $V_b t - z$. Найдены условия полной нейтрализации тока и показано, что в этом случае радиальная составляющая силы, действующей на электроны, пропорциональна градиенту плотности сгустка dn_b/dr . Для уменьшения этой силы было предложено использовать внешнее магнитное поле \mathbf{B}_0 , направленное вдоль оси z .

С целью проверки корректности применения гидродинамического описания при рассмотрении такого процесса в данной работе проведено численное моделирование. Оно показало, что ламинарное гидродинамическое течение электронной жидкости может нарушаться из-за отражения частиц в поле разделения заряда и их дальнейшего захвата ионным сгустком.

Результаты численного моделирования

В численном моделировании использован одномерный вариант метода частиц в ячейке. Координата z отсчитывалась вдоль направления распространения сгустка. При этом учитывалось только электростатическое поле разделения заряда. Ионный сгусток до входа в плазменный слой имел гауссовский профиль распределения плотности. Плазменный слой с обеих сторон был окружен вакуумными областями и имел ступенчатый профиль плотности на границах. В начальный момент плазма в слое считалась холодной. Отношение масс электронов и ионов полагалось равным $m_i/m_e = 1840$. Граничные условия для поля определялись по значению начального заряд сгустка Q_0 .

Степень компенсации заряда вычислялась по формуле:

$$f = 1 - Q_f / Q_0,$$

где Q_f – полный заряд в области локализации сгустка после прохождения плазменного слоя. Безразмерная скорость сгустка $\beta_b = V_b/c$ варьировалась в пределах 0,1–0,7. Начальная плотность N_b в центре сгустка изменялась в интервале 0,1–1,0 от начальной плотности плазмы n_0 . Влиянием поля разделения заряда на движение ионов можно пренебречь, так как характерные времена рассматриваемых процессов меньше ω_{Li}^{-1} (ω_{Li} – ионная плазменная частота).

Из результатов проведенных численных экспериментов следует, что основная часть электронов захватывается сгустком на начальном этапе при его полном вхождении в слой. На рис. 1 представлены фазовые плоскости электронов плазмы и ионов сгустка при входе сгустка в слой. Безразмерные импульсы u_{ze} и u_{zi} заданы в единицах $m_e c$

и $m_i c$. Захват происходит под действием отрицательного поля E_z , возникающего из-за смещения граничных электронов плазменного слоя при входе в него ионного сгустка.

Степень компенсации заряда f слабо зависит от толщины плазменного слоя L (рис. 2). Для начальной скорости сгустка $V_b = 0,5c$ и $n_b/n_0 = 0,1$ степень компенсации заряда составляла $f \approx 0,5$. При таких параметрах в работах [9–12] предполагалась полная нейтрализация ионного сгустка. С ростом скорости сгустка происходит уменьшение степени компенсации заряда (рис. 3). Процесс захвата электронов сопровождается образованием пучков ускоренных электронов, часть из которых начинает совершать колебания внутри сгустка. С ростом плотности сгустка сначала наблюдается возрастание степени компенсации заряда, а в дальнейшем плазменный слой начинает силь-

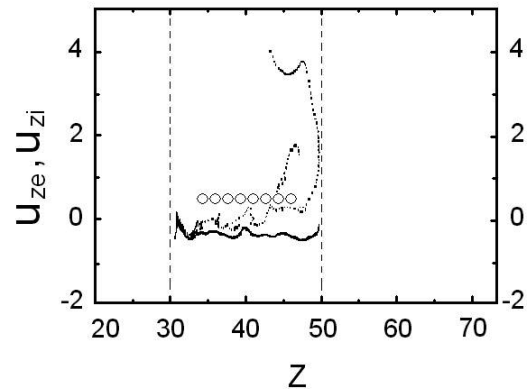


Рис. 1. Фазовые плоскости электронов плазмы (●) и ионов сгустка (○) при входе сгустка в плазменный слой. Импульсы u_{ze} и u_{zi} даны в единицах $m_e c$ и $m_i c$. Область, занятая плазмой, отмечена пунктиром. Координата z выражена в единицах c/ω_p , время t в единицах ω_p^{-1} . $V_b = 0,5$, $n_b/n_0 = 0,1$, длина сгустка $L_b = 8,0$, толщина слоя плазмы $L = 20$.

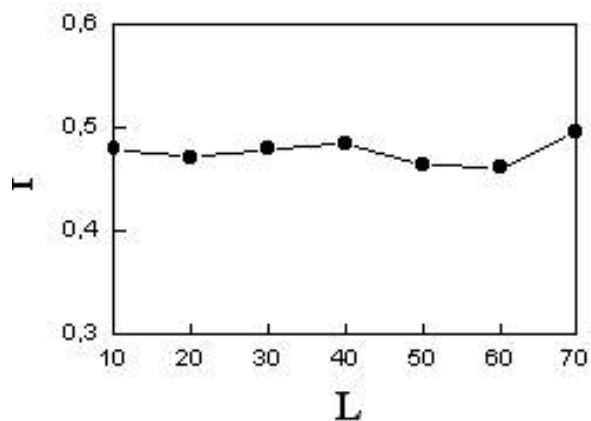


Рис. 2. Зависимость степени компенсации заряда от ширины плазменного слоя (в единицах c/ω_p). $L_b = 8$, $\beta = 0,5$, $n_b/n_0 = 0,1$.

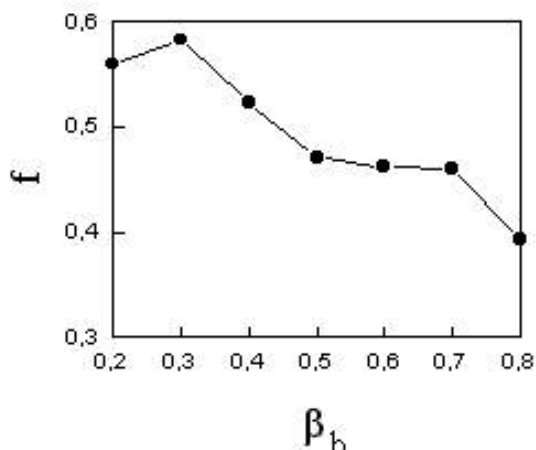


Рис. 3. Зависимость степени компенсации заряда от скорости ионного сгустка (в единицах c). $L_b = 8$, $L = 20$, $n_b/n_0 = 0,1$.

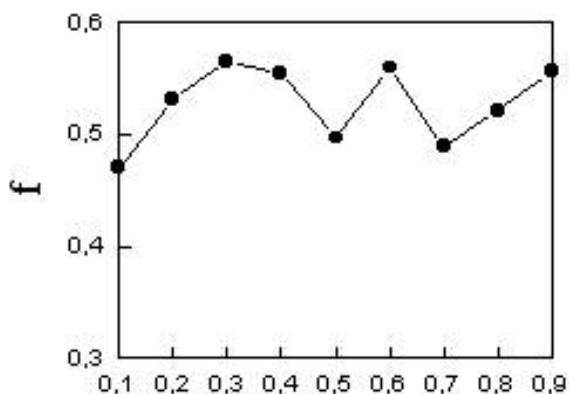


Рис. 4. Зависимость степени компенсации заряда от плотности ионного сгустка. $L_b = 8$, $\beta = 0,5$, $L = 20$

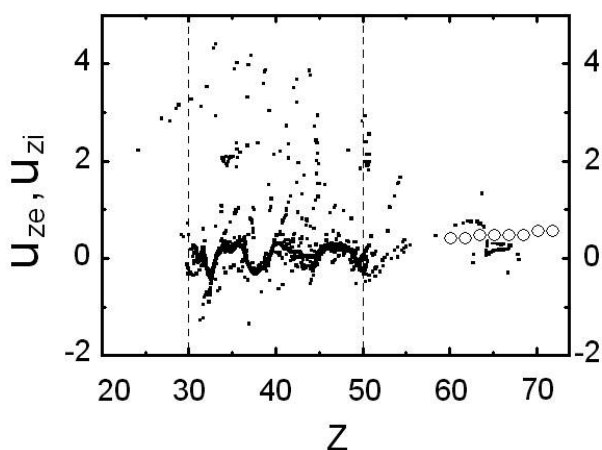


Рис. 5. Захват электронов при полном прохождении ионного сгустка через плазменный слой при $t = 100$. Обозначения и параметры те же, что на рис. 1.

но возмущаться и величина f изменяется нерегулярным образом (рис. 4).

Рис. 5 иллюстрирует захват электронов при полном прохождении ионного сгустка через плазменный слой при $t = 100$. Обозначения и параметры те же, что на рис. 1.

Таким образом, численные эксперименты показали, что основное влияние на процесс нейтрализации заряда ионов оказывает захват электронов плазмы самосогласованным полем, возникающим при входе сгустка в слой. Это поле вызывает многопоточное возвратное движение электронов, для описания которого необходимо кинетическое рассмотрение.

Заключение

В работе показано, что при прохождении ионного сгустка через слой плазмы происходит захват части электронов плазмы полем сгустка. Однако, в отличие от гидродинамического описания [9–12], этот процесс имеет существенно кинетическую природу. Это связано с тем, что при входе ионного сгустка в плазму возникает дополнительное электрическое поле разделения заряда, вызванное движением электронов на границах плазмы. Под действием суммарного электрического поля электроны плазмы отражаются в области задней границы сгустка и начинают двигаться вместе с ним. Из результатов проведенных численных экспериментов следует, что основная часть захваченных электронов образуется при входе сгустка в слой. Это подтверждается тем, что степень компенсации заряда слабо зависит от ширины слоя. С возрастанием начальной скорости сгустка количество захваченных электронов уменьшается и соответственно степень компенсации заряда падает. При увеличении плотности сгустка вплоть до некоторого значения отношения плотностей n_b/n_0 степень компенсации заряда возрастает. При более высоких значениях этого отношения происходят сильные нерегулярные возмущения скоростей электронов в слое и монотонное возрастание степени компенсации нарушается.

Полученные результаты могут быть использованы при постановке экспериментов по взаимодействию интенсивных ионных пучков с плазмой.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 10-02-01302.

Литература

1. Габович М.Д. // УФН. 1977. Т. 121. С. 259.
2. Joshi C. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 055501.
3. Govil R., Leemans W.P., Backhaus E.Yu., Wurtele J. S. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 3202.
4. Campbell R.B., Kodama R., Mehlhorn T.A., Tanaka K.A., Welch D.R. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 055001.
5. Sentoku Y., Mima K., Kaw P., Nishikawa N. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. P. 155001.
6. Davidson R.C., Qin H. Physics of Intense Charged Particle Beams in High Energy Accelerators. World Scientific. Singapore. 2010.

7. Roy P.K., Yu S.S. et al. // Phys. Plasmas. 2004. V. 11, P. 2890.

8. Roy P.K., Yu S.S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95, P. 234801.

9. Kaganovich I.D., Shvets G., Startsev E.A., Davidson R.C. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. P. 4180.

10. Kaganovich I.D., Startsev E.A., Davidson R.C. // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. P. 3546.

11. Dorf M.A., Kaganovich I.D., Startsev E.A., Davidson R.C. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. P. 075003.

12. Kaganovich I.D., Davidson R.S. et al. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 056703.

Compensation of volumetric ion bunch charge during passing plasma layer

V.B. Krasovitskiy¹ and V.A. Turikov²

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences
4 Miuskaya sq., Moscow, 125047, Russia
E-mail: krasovit@mail.ru

²Russian University of People's Friendship
6 Mikluho-Maklay str., Moscow, 117198, Russia
E-mail: vturikov@yandex.ru

The one-dimensional numerical simulation of the ion bunch passing through the plasma layer is conducted. The bunch charge compensation phenomenon is investigated in this interaction. It is shown that the capture of the plasma electrons part by the total charge separation field takes place. The largest number of electrons are captured at the initial stage of interaction during the ion bunch entry into the layer. The dependence of the charge compensation degree on the bunch and plasma layer parameters is found. The formation of the standing electrostatic wave after the complete bunch transport through the layer is demonstrated.

PACS: 52.40.Mj

Keywords: ion beams, plasma-beam interaction, nonneutral plasma, compensation, ion beams charge.

Bibliography — 12 references

Received July 10, 2013