

Параметры электронного пучка, инжектируемого в магнитную ловушку плазменного ускорителя

В. В. Андреев, А. А. Новицкий, Л. А. Винниченко, А. М. Умнов, Д. Д. Ндонг

Определены параметры инжектора аксиального плазменного пучка, инжектируемого в плазменный ускоритель, действующий на основе гирорезонансного ускорения электронов в реверсном магнитном поле. Методом частиц в ячейке проведено численное моделирование захвата электронов пучка в режим гирорезонансного ускорения. Определено оптимальное время аксиальной инжекции пучка в магнитную ловушку пробочного типа. Найдены параметры пучка, удовлетворяющие условиям эффективного захвата частиц в режим гиромагнитного авторезонанса.

PACS: 52.50.Sw

Ключевые слова: гиромагнитный авторезонанс, эффективность захвата, инжекция плазменного пучка, численное моделирование.

Введение

В проведенных ранее работах [1, 2] показано, что режим гиромагнитного авторезонанса (ГА) в магнитном поле пробочного конфигурации приводит к образованию плазменных сгустков с умеренно релятивистской (масштаба сотен кэВ) электронной компонентой. Процесс ГА не требует никакого предварительного ускорения частиц при их инжекции в зону ускорения, т. е. они могут вводиться в зону захвата извне, либо генерироваться непосредственно в самой зоне в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), как это было реализовано в работах [1, 2]. Такой подход накладывал ряд ограничений на возможность управления числом захваченных в процесс ускорения электронов и форм-фактором области захвата.

Для изучения возможности улучшения выходных параметров плазменного ускорителя и обеспечения режима накопления генерируемых ускорителем релятивистских плазменных сгустков была предложена схема ГА-ускорения в реверсном импульсном магнитном поле внутри протяженной пробочной магнитной ловушки. Целью работы являлось определение требований, предъ-

являемых к параметрам внешней инжекции в предложенной схеме ускорения на численной модели, а также разработка и апробация импульсно-периодического инжектора, обеспечивающего оптимальные рабочие режимы разрабатываемого плазменного ускорителя.

Экспериментальный стенд и описание инжектора

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрический СВЧ-резонатор (мода колебаний TE₁₁₈, резонансная частота 2,45 ГГц), помещенный в осесимметричное магнитное поле протяженной пробочкой конфигурации (пробочное соотношение $R = 1,2$; $L = 80$ см) с индукцией магнитного поля в минимуме ловушки 1200 Гс. В симметричных пучностях электрического поля стоячей волны установлены катушки импульсного магнитного поля.

Направление тока в импульсных катушках обеспечивает создание магнитного поля с направлением, противоположным стационарному полю, что позволяет создать локальный «провал» стационарного магнитного поля до уровня, соответствующего значению ЭЦР для рабочей частоты резонатора. Уменьшение тока в импульсных катушках и восстановление исходного профиля стационарного магнитного поля обеспечивает режим захвата и ускорения электронов исходной плазмы в режим ГА и генерацию релятивистских плазменных сгустков в двух симметричных зонах установки (рис. 1). Восстановление исходного профиля стационарного магнитного поля с малыми градиентами приводит к движению сгустков в область минимума ловушки и их накоплению. Уста-

Андреев Виктор Викторович, доцент.
Новицкий Андрей Александрович, аспирант.
Винниченко Леонид Анатольевич, аспирант.
Умнов Анатолий Михайлович, доцент.
Ндонг Ондо Димитри Дорлеанс, студент.
Российский университет дружбы народов.
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.
E-mail: temple18@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 марта 2015 г.

© Андреев В. В., Новицкий А. А., Винниченко Л. А.,
Умнов А. М., Ндонг Д. Д., 2015

новка работает в импульсно-периодическом режиме с изменяемой скважностью.

Цепь анодного питания инжектора оснащена коммутатором на основе мощных силовых транзис-

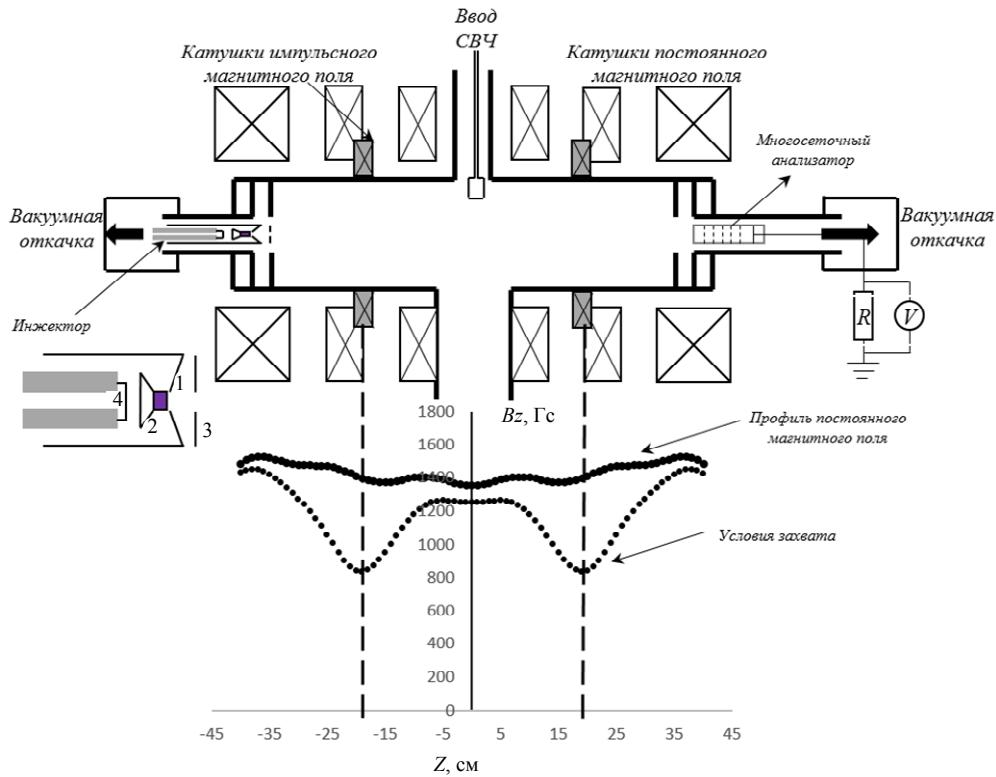


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Предварительный анализ условий инжекции (параметров инжектируемого пучка) на численной модели показал, что применение внешнего инжектора повышает надежность и управляемость процесса инжекции, но при этом накладывает ряд требований на параметры плазмы, инжектируемой в зону захвата.

Для верификации режима внешней инжекции был разработан инжектор с электронно-оптической системой Пирса (ЭОС) с катодом на основе гексаборида лантана (LaB_6), который был сопряжен с полем пробочкой магнитной ловушки.

Конструкция анодно-катодного узла (см. сноска на рис. 1) представляет собой следующий комплекс: катод (диаметр $d = 3,5$ мм), помещенный в оправу с молибденовым тепловым отражателем (2), прикатодный электрод (электрод Пирса) (1) и анод с центральным отверстием (3). Электрод Пирса имеет потенциал, равный потенциальному катода, и располагается так, что его поверхность является продолжением поверхности катода. Нагрев катода осуществляется косвенным нагревателем резистивного типа из танталовой фольги. Нагреватель (4) представляет собой две скрещенные под углом 90° полоски фольги тантала ($20,0 \times 5,0 \times 0,15$) мм, включенных последовательно (рис. 1). Такая конструкция обеспечивает эффективный нагрев катода до рабочих температур $1500—1800$ °C.

торов с изолированным затвором (MOSFET IRFPG50), который обеспечивает импульсно-периодический режим его работы от генератора импульсов Tektronix AFG 3252.

Инжектор размещался в области магнитной пробки в возрастающем в продольном направлении магнитном поле, что обеспечивало компенсацию сил кулоновского расталкивания и улучшало сходимость пучка. Рабочий диапазон давлений в резонаторе составлял $1 \cdot 10^{-4}—1 \cdot 10^{-5}$ Торр. Это позволило получить на входе в ловушку в условиях низких давлений пучок с резкими границами и контролируемыми параметрами.

Численная модель

Трехмерное численное моделирование плазмы в условиях гиromагнитного авторезонанса при сторонней инжекции плазмы проведено по методу частиц в ячейке [3]. Плазма инжектируемого пучка считалась полностью ионизированной с однократно ионизированными атомами аргона. Процессы ионизации остаточного газа не учитывались. Уравнения движения электронов решалось по схеме Бориса, ионов — по схеме «с перешагиванием».

Целью моделирования являлось формулирование основных требований, предъявляемых к ре-

жиму внешней инжекции, и определение диапазонов изменения характеристик пучка частиц, необходимых для поиска рабочих режимов инжектора, которые бы обеспечивали эффективный захват частиц в реализуемой схеме ускорения.

Обсуждение полученных результатов

Изучение внешней инжекции на численной модели проводилась при следующих основных параметрах: начальная плотность пучка варьировалась в пределах 10^9 — 10^{10} см $^{-3}$, диаметр пучка — 2—6 мм, энергия инжекции электронов 20—300 эВ, напряженность электрической компоненты СВЧ- поля в зоне ускорения — от 300 В/см до 3 кВ/см.

В предлагаемом сценарии ускорения наиболее простым методом инжекции является аксиальная инжекция заряженных частиц. Ввиду того, что ГА-ускорение происходит за время, намного превышающие время пролета частицы через зону ГА, то возникает задача продольного удержания частиц в течение цикла ускорения. Такое удержание обеспечивается созданием пробочного магнитного поля в области захвата.

Оценка времени эффективной инжекции плазменного пучка в камеру ускорителя была получена посредством численного моделирования. На рис. 2 представлена зависимость числа электронов в объеме камеры в случае аксиальной инжекции пучка диаметром 5 мм при условии синхронизации начала инжекции и старта нарастания магнитного поля. В минимумах магнитного поля локальных ловушек индукция поля равнялась $B_0 = \frac{mc\omega}{e} = 875$ Гс, где m и e — масса покоя и заряд электрона соответственно, c — скорость света в вакууме, ω — частота СВЧ-поля. Амплитуда напряженности электрической составляющей СВЧ- поля $E = 1$ кВ/см, темп нарастания магнитного поля 15 Гс/мкс.

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 2, показывают, что время эффективной инжекции (фиксируется в момент уменьшения числа частиц в камере) составляет от 1100 до 1500 периодов СВЧ-поля для различных величин энергии инжекции W_{inj} , или 4—6 мкс. Отметим, что инжекция является наиболее эффективной при $W_{inj} = 100$ эВ. В этом случае в камере остается максимальное число частиц.

При снижении темпа нарастания магнитного поля оптимальное время инжекции пропорционально возрастает. Таким образом, при темпе нарастания магнитного поля, планируемого в эксперименте — (0,75—1,0) Гс/мкс, оценочное время инжекции составляет около 100 мкс.

Численные расчеты, выполненные при различных продольных энергиях пучка, показали (рис. 3, а) наличие максимума эффективности за-

хвата, который соответствует энергии $W_{inj} = 100$ эВ. Величина плотности плазмы инжекции также влияет на эффективность захвата (рис. 3, б). В диапазоне рабочих значений напряженностей электрического поля (до 1 кВ/см) в зоне ускорения эффективность захвата падает с повышением плотности. В случае сравнительно высокой плотности пучка ($n \geq 10^{10}$ см $^{-3}$) захват практически прекращается.

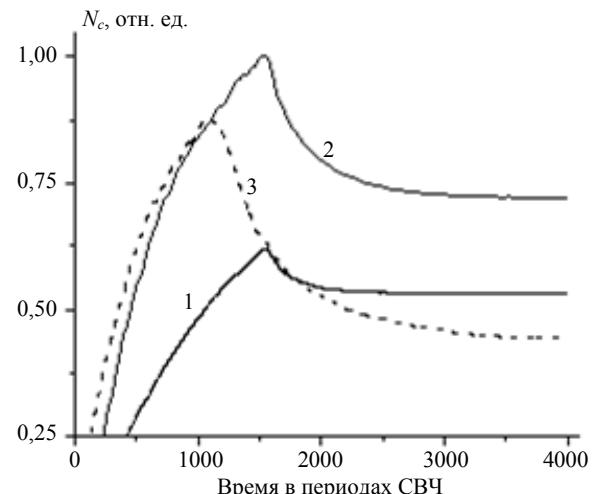


Рис. 2. Зависимость числа модельных электронов захваченных в режим ГА-ускорения от времени инжекции пучка: 1 — $W_{inj} = 20$ эВ, 2 — $W_{inj} = 100$ эВ, 3 — $W_{inj} = 300$ эВ

Диагностика пучка и создаваемой им плазмы проводилось с помощью коллекторов, цилиндра Фарадея, а также многосеточного энергоанализатора, помещаемых в противоположной положению инжектора магнитной пробке, расстояние между которыми составляло 80 см. В импульсном режиме работы инжектора параметры пучка (ток, анодное напряжение, длительность импульса, скважность) измерялись с помощью осциллографа. Излучение, возникающее в камере при взаимодействии электронов пучка с газом и плазмой, регистрировалось в перпендикулярном направлении по отношению к направлению распространения пучка. Ввиду требований, предъявляемых к давлению в резонаторе в режиме ускорения, все измерения режима инжекции были проведены в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Испытания показали, что непосредственно за анодом электронный пучок при нижней границе указанного диапазона давлений имеет четко выраженные границы (верхнее фото рис. 4, б) и его диаметр соответствует диаметру катода — 3,5 мм. Измерения показали, что разработанный инжектор имеет следующие характеристики и параметры: величина первеанса пучка составляет $6 \text{ мкА/B}^{3/2}$, эммитанс пучка $1,75 \cdot 10^{-5}$ м·рад. Фокусировка пучка возрастающим полем магнитной пробки обеспечивала токопрохождение в рабочий объем на уровне 95 %.

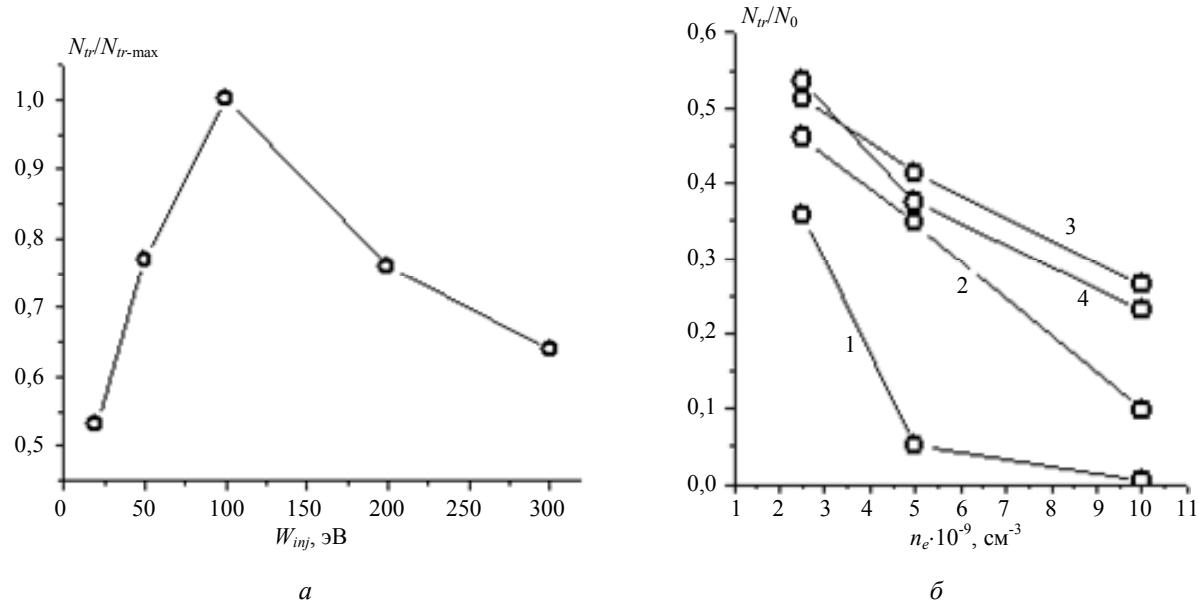


Рис. 3. Зависимость эффективности захвата: *а* — от энергии инжекции пучка, *б* — от плотности инжеектируемого пучка при различных величинах напряженности электрического СВЧ- поля: 1 — $E = 0,25$ кВ/см; 2 — $E = 0,5$ кВ/см; 3 — $E = 1$ кВ/см; 4 — $E = 3$ кВ/см. N_{tr} — число захваченных частиц, N_0 — число частиц в камере в момент старта ГА

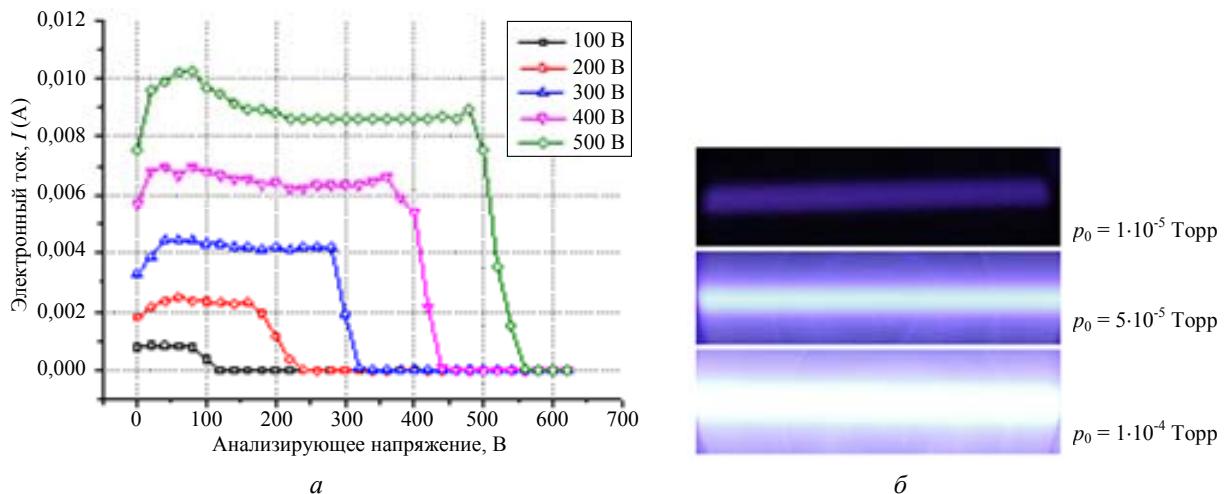


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики пучка от величины анализирующего напряжения при разных анодных напряжениях (*а*), фотографии свечения газа при транспортировке пучка при различных давлениях, но при фиксированном значении анодного напряжения (*б*)

Испытания показали, что инжектор устойчиво функционирует в импульсно-периодическом режиме, обеспечивая следующие временные характеристики: длительность импульса может изменяться от 20 мкс до 10 мс с частотой от 1 до 100 Гц, передний и задний фронт импульса тока не превышают 5 мкс.

Временные параметры, установленные экспериментально, соответствуют полученным при расчетах на численной модели в привязке к параметрам ускорения, реализуемым на установке.

Таким образом, для обеспечения эффективного захвата электронов необходимо осуществ-

лять инжекцию в момент времени, соответствующий провалу магнитного поля до уровня ЭЦР или чуть ниже с длительностью порядка 100 мкс, что соответствует рабочим параметрам инжектора. Передний фронт импульса инжекции должен в этом случае быть синхронизирован с моментом времени достижения импульсным магнитным полем своего амплитудного значения.

Измерения полного тока проводились с помощью цилиндра Фарадея с апертурной диафрагмой, размер отверстия которой был определен по автографу пучка на коллекторе, помещенном в противоположной инжектору магнитной пробке.

Измерения показали, что при щадящей мощности накала (350 Вт) величина тока, проведенного сквозь магнитную ловушку (80 см), составила 10 мА при напряжении на аноде 600 В. Ресурс накала при данной мощности составляет более 300 часов.

На рис. 4, *а* приведены вольт-амперные характеристики пучка от величины анализирующего напряжения, измеренные с помощью многосеточного анализатора.

Увеличение температуры эмиттера позволяло поднять величину тока до максимально зарегистрированного значения 35 мА, однако ресурс работы резко сокращался. Полученные значения тока соответствуют значениям плотностей инжекции (рис. 3, *б*), необходимым для эффективного захвата в режим ускорения для реализуемых на установке значений параметров ускорения (скорость нарастания магнитного поля 1 Гс/мкс, напряженность электрического поля 500 В/см).

Измерения спектра электронов с помощью многосеточного анализатора, помещенного в магнитной пробке, показало, что в условиях нижней границы рабочих давлений энергетический разброс пучка составляет не более 10 % от его энергии.

На рис. 4, *б* приведены фотографии свечения газа при транспортировке пучка в различных условиях по давлению, но при фиксированном значении анодного напряжения. При этом ток увеличивается от 5 до 35 мА. Анализ полученных изображений позволил определить поперечные размеры пучка, который зависит от величины давления в резонаторе. В диапазоне рабочих давлений поперечные размеры изменялись от 4 мм при $1 \cdot 10^{-5}$ Торр до 15 мм при $1 \cdot 10^{-4}$ Торр. Видно, что увеличение давления приводит к увеличению поперечного сечения шнура, смещению спектра свечения в красную область, увеличения яркости, а полученная плазма занимает практически весь объем резонатора. Следует отметить, что наряду со скачкообразным изменением как характера свечения, так и спектра свечения регистрируется излучение на частоте 48 МГц, природа которых требует уточнения. При увеличении ускоряющего напряжения границы плазменного образования, где локализованы наиболее интенсивные колебания, становятся более размытыми.

Факты скачкообразного изменения тока, изменение характера и спектра свечения плазмы, наличие интенсивных колебаний свидетельствует о возможности зажигания ППР в области верхней границы рабочего диапазона давлений.

Заключение

Результаты, полученные в данной работе, показали, что разработанный способ создания начальной плазмы — аксиальная инжекция плазменного пучка — позволяет осуществить инжекцию пучка с контролируемыми параметрами в зону ускорения.

На численной модели и экспериментально показано, что в применяемой схеме ускорения плазменный пучок должен удовлетворять следующим условиям: интенсивный пучок с малыми угловыми характеристиками, позволяющими привести его через сильную магнитную пробку на входе в ловушку, иметь малый энергетический разброс как по энергии, так и по углу, иметь возможность менять энергию и ток пучка, варьировать длительность инжекции.

Заявленные требования и значения параметров, необходимых для эффективной инжекции, были учтены в конструкции и продемонстрированы экспериментально.

Полученные результаты позволяют рассчитывать на дальнейший прогресс в исследованиях по изучению процесса генерации релятивистских плазменных образований в условиях гиromагнитного авторезонанса в протяженной магнитной ловушке пробочного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М. и др. // ПТЭ. 2012. № 3. С. 5.
2. Андреев В. В., Новицкий А. А., Умнов А. М. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2013. Т. 36. Вып. 1. С. 86.
3. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. — Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995.

Properties and parameters of an electron beam injected into a mirror magnetic trap of a plasma accelerator

V. V. Andreev, A. A. Novitsky, L. A. Vinnichenko, A. M. Umnov, and D. O. Ndong

Peoples' Friendship University of Russia (PFUR)
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia
E-mail: temple18@mail.ru

Received March 18, 2015

The parameters of the injector axial plasma beam intended for the injection of plasma into the plasma accelerator, acting on the basis gyroresonance acceleration of electrons in the reverse magnetic field are defined experimentally and by computer simulation. The plasma accelerator is designed to create a plasma bunch with moderately relativistic electron component in a mirror magnetic trap. It is shown that for effective trapping of electrons in the acceleration mode should be reduced to a reverse magnetic field to below the condition of electron cyclotron resonance. The dependence of the optimal time of beam injection into a magnetic trap on the parameters of the injected beam and the strength of the electric microwave field is studied. It is shown that the number of electrons trapped in the gyroresonance acceleration mode is about 50 % of the total number of injected particles when performing optimal injection conditions.

PACS: 52.50.Sw

Keywords: gyromagnetic autoresonance, trapping efficiency, the plasma beam injection, acceleration, computer simulation.

REFERENCES

1. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, A. M. Umnov, et al., Instrum. Exp. Tech., No. 3, 5 (2012).
2. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, A. M. Umnov, et al., VANT. Ser. Termoyad. Sintez **36** (1), 86 (2013).
3. C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation* (Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995).