УДК 533.9.08

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДИНАМИКОЙ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО УСКОРЕНИЮ ИОНОВ НА ГЕНЕРАТОРЕ РЭП

О.С. Белозеров, С.А. Данько, С.С. Ананьев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Ионная имплантация в поверхность твёрдых материалов применяется для изменения атомного состава и структуры поверхности обрабатываемого материала, тем самым изменяя его свойства. Одним из способов получения импульсного пучка ионов мегаэлектрон-вольтных энергий является использование электрического поля виртуального катода, создаваемого пучком релятивистских электронов при его взаимодействии с фольгой-анодом. Это электрическое поле ускоряет ионы до энергий, в несколько раз превышающих напряжение генератора импульсов, умноженное на ионный заряд. При исследовании ускоренных ионов было обнаружено последовательное ускорение нескольких ступок ионов в одном пуске, вследствие чего оказалось недостаточно интегрального по времени изображения с камеры-обскуры оказалось недостаточно для корректного измерения площади фокусировки электронного пучка и плотности электронного тока на анодной фольге. По этой причине была разработана новая диагностика, представленная щелевой развёрткой на основе световой электронно-оптической камеры K008 с временным разрешением ≈ 5 нс и пространственным разрешением $\approx 0,2$ мм. Измерение с помощью новой диагностики оказывается более корректным, и плотность тока в 2 раза больше по сравнению с интегральными по времени измерениями.

Ключевые слова: релятивистский электронный пучок, генерация ионов, амбиполярное поле, времяпролётный спектрометр, щелевая развёртка, плотность электрического тока.

A TECHNIQUE FOR OBSERVING THE DYNAMICS OF ELECTRON BEAM FOCUSING IN THE EXPERIMENT ON IONS ACCELERATION IN A REB GENERATOR

O.S. Belozеров, S.A. Dan'ko, S.S. Ananyev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Ion implantation into the surface layer of solid materials is used to change the atomic composition and surface structure of the processed material, thereby modifying of its properties. A way to obtain a pulsed ion beam of MeV's energy is to use the electric field of a virtual cathode created by a relativistic electron beam at its interaction with the anode foil. This electric field accelerates ions up to energies several times higher than the voltage of the pulse generator, multiplied by the charge of ions. Studying of accelerated ions, the consequent acceleration of several ion bunches was detected in a single run, so the time-integrated image from the pinhole camera was not enough for correct measuring the focus area of the electron beam and current density on the anode foil. Under this reason, a new diagnostic was developed, which was based on the light streak-camera K008, with the time resolution of ≈ 5 ns and the spatial resolution of ≈ 0.2 mm. The current density obtained by this new diagnostic is more correct estimation. It is twice as much as in the time-integrated measurements.

Key words: relativistic electron beam, ion generation, ambipolar field, time-of-flight spectrometer, streak-camera, electric current density.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-80-86

ВВЕДЕНИЕ

В импульсных генераторах релятивистских электронных пучков (РЭП), воздействующих на прозрачную для них нагрузку, существует явление ускорения ионов под действием возникающего амбиполярного поля [1, 2]. Ионы ускоряются в направлении виртуального катода, создаваемого прошедшими сквозь фольгу-анод релятивистскими электронами. В этом режиме амбиполярного ускорения энергия ионов может в несколько раз превышать приложенное напряжение импульсного генератора, умноженное на ионный заряд. Такой способ ускорения позволяет получить энергию ионов, достаточную для проникновения в твёрдое тело на несколько микрон, что, например, увеличивает износостойкость режущего инструмента [3]. Технология амбиполярного ускорения может иметь существенное преимущество перед традиционными методами, такими как циклические ускорители заряженных частиц, за счёт невысокой стоимости оборудования и его эксплуатации. В рамках исследований по ускорению ионов была разработана новая диагностика, представленная щелевой развёрткой, которая позволила измерять плотность тока электронов на анодной фольге не только интегрально, но и с временным разрешением.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема эксперимента по амбиполярному ускорению ионов в вакуумном диоде импульсного генератора РЭП представлена на рис. 1. Она аналогична предыдущим схемам экспериментов, подробно описанных в работе [4]. Одной из основных задач экспериментов было измерение параметров сгустков ионов в зависимости от плотности тока РЭП на анодной фольге. Электронный пучок генерировался в высоковольтном диоде 1—2, в котором анодом 2 обычно служила прозрачная для релятивистских электронов десятимикронная алюминиевая фольга. Ионный пучок (показан пунктирными стрелками и символом i на рис. 1) генерировался в направлении движения электронов и попадал преимущественно в осевую пролётную камеру, а также в наклоненные к оси под углами 18° — $22,5^\circ$ патрубки 4 с диагностической аппаратурой. Максимальная длина патрубков и осевой камеры составляли 182 см. Вакуумная камера откачивалась до остаточного давления $P < 10^{-4}$ торр. Осевое пространство было занято времяпролётным спектрометром с четырьмя вакуумными рентгеновскими диодами (ВРД), снабжёнными разными фильтрами.

Рис. 1. Схема вакуумной камеры генератора «Катран» с диодным узлом: 1 — катод; 2 — анодная фольга; 3 — боковые диагностические окна; 4 — патрубки, направленные на фокусное пятно электронного пучка; 5 — обскура; 6, 12 — сцинтилляторы; 7, 9, 13 — объективы; 8 — поворотная призма; 10 — CMOS-матрица фотоаппарата; 11 — первая щель; 14 — торец световода с регулярным расположением волокон; 15 — вакуумные рентгеновские диоды

Измерения ионных потоков в эксперименте проводились с помощью следующих основных диагностических методик. Энергия отдельных ионов определялась времяпролётной методикой по измерению скорости их движения на известной базе. В качестве датчиков использовался ВРД с металлическими (никелевыми) фотокатодами. Катоды ВРД чувствительны не только к вакуумному ультрафиолетовому и мягкому рентгеновскому излучению, но и к попадающим на них быстрым электронам и ионам, которые вызывают вторичную электронную эмиссию. В части экспериментов для отсечки мягкого рентгеновского излучения в интервале $h\nu < 4$ кэВ и низкоэнергичных ионов перед ВРД устанавливались фильтры из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм или лавсановой плёнки толщиной от 2 до 10 мкм, для предотвращения попадания релятивистских электронов использовались постоянные магниты.

Фотографирование камерой-обскурой позволяет измерить усреднённую по времени площадь анодной фольги, на которую воздействует электронный пучок, и плотность тока электронов на ней по измеренному шунтом току. Это измерение проводилось в тормозном рентгеновском излучении электронов. Светимость объекта в мягком тормозном рентгеновском излучении пропорциональна плотности РЭП в данной точке анодной фольги. Изображение объекта на сцинтилляторе 6, сделанное камерой-обскурой в квантах энергией $h\nu > 4$ кэВ, переносится на CMOS-матрицу фотоаппарата 10 с помощью оптической системы из двух объективов 7, 9 и поворотной стеклянной призмы 8. Осуществлённая схема регистрации рентгеновского изображения на цифровом фотоаппарате имеет преимущество оперативного получения информации по сравнению с регистрацией на рентгеновскую фотоплёнку. Подробное описание этих используемых диагностик приведено в работе [5].

При исследовании ускоренных ионов было обнаружено последовательное ускорение нескольких сгустков ионов в одном пуске. Фотоаппарат, регистрирующий свечение сцинтиллятора, даёт интегральное изображение РЭП на анодной фольге, чего недостаточно для наблюдения за динамикой фокусиров-

ки электронного пучка и измерения его плотности в короткие интервалы времени, соответствующие ускорению ионов. В связи с этим для определения зависимости параметров ускорения ионов от плотности электронного тока во времени была создана методика на основе хронографической электронно-оптической камеры K008 [6]. Общая схема регистрации представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема регистрации движущегося фокусного пятна с помощью щелевой электронно-оптической камеры с двумя щелями, расположенными во взаимно перпендикулярных направлениях: 1 — анодная фольга, на которой скачкообразно во времени (Δt_1 — Δt_2) и пространстве (d_1 — d_2) фокусируется РЭП; 2, 5 — взаимно перпендикулярные щели; 3 — пластиковый сцинтиллятор; 4 — объектив; 6 — световод с регулярным расположением волокон (на выходном торце оптический контакт со световолоконной шайбой K008); 7 — электронно-оптическая камера K008; 8 — щелевая развёртка на мониторе (m — масштабный коэффициент); 9 — экранированный ящик

Для описания принципа действия рассмотрим условную ситуацию, в которой круглое фокусное пятно скачкообразно перемещается по анодной фольге 1 из положения d_1 в интервал времени Δt_1 в положение d_2 в интервал времени Δt_2 . Щель 2 строит в мягких рентгеновских лучах из круглого пятна прямоугольное изображение на тонком $\delta \approx 0,2$ мм пластмассовом сцинтилляторе 3, который преобразует рентгеновское изображение в световое. При этом в рентгеновском диапазоне пространственное разрешение детектора будет определяться как шириной щели и геометрией схемы, так и толщиной сцинтиллятора. Вклад последнего фактора составит $\Delta_{\text{det}} \approx \delta \sin \beta \approx 0,02$ мм, где β — максимальный угол падения рентгеновских лучей на сцинтиллятор. Перед сцинтиллятором располагается тонкая алюминиевая фольга толщиной 10 мкм, которая пропускает рентгеновское излучение, но не пропускает свет. Объектив 4 переносит полученное изображение со сцинтиллятора на торец световода 6 с регулярным расположением волокон. Перед входным световодом устанавливается скрещенная под прямым углом с первой щелью 2 вторая щель 5. Она выбирает для временной развёртки на K008 поперечный срез в центральной части светового изображения, обеспечивающий максимальный обзор анодной фольги. С противоположного конца световода, имеющего оптический контакт с входной световолоконной шайбой K008, изображение переносится на фотокатод 7. Первая щель 2 имеет ширину 0,1 мм и сделана в танталовом диске толщиной 5 мм. Вторая щель 5 шириной 0,1 мм, изготовленная из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм, вместе с привязанной к размеру экрана K008 продолжительностью временной развёртки определяет временное разрешение схемы регистрации. Пространственное разрешение в эксперименте $\approx 0,2$ мм, временное разрешение на развёртке 300 нс/см ≈ 5 нс. Временное разрешение сцинтиллятора (полистирол с р-терфенилом и РОРОР) составляет ≈ 2 нс.

На рис. 3 показана схема регистрирующей системы с горизонтально расположенной щелью 2, по которой можно рассчитать поле зрения. Удаление щели от анода составляет 117,5 мм и от сцинтиллятора,

Рис. 3. Обзор регистрирующей системы: 1 — анодная фольга; 2 — щель; 3 — патрубок; 4 — алюминиевая фольга; 5 — сцинтиллятор; траектория лучей (— — —) относится к горизонтальному сечению канала регистрации

на котором строится изображение, 82,5 мм. Высота щели, равная 14 мм, ограничивает поле зрения объекта b по условной горизонтали, которое составляет $b = 14(82,5 + 117,5)/82,5 = 34$ мм. Обзор по вертикали $14 \cdot 17,5/82,5 = 20$ мм.

Изображение с экрана камеры 7 (см. рис. 2) считывается с помощью цифровой телевизионной приставки и передаётся на персональный компьютер. Ввиду того, что электронно-оптическая камера 7 подвержена воздействию электромагнитных полей и наводок, возникающих при работе генератора РЭП, она имела только один гальванический контакт с окружением по запускающему кабелю и была помещена вместе с компьютером в экранированный ящик 9, снабжённый блоком бесперебойного питания [7].

Полученное изображение позволяет определить долю электрического тока РЭП, попадающего в фокусное пятно в любой момент времени. К сожалению, с помощью этой методики можно измерить пятно только в одном направлении — поперёк танталовой щели. Размер вдоль этой щели оценивается по изображению, получаемому камерой-обскурой интегрально по времени.

Для выработки алгоритма оценки плотности тока предполагается, что область S , экспонируемая РЭП, светит равномерно, кроме одного прямоугольного пятна $a_1 \times a_1$, которое тоже светится равномерно, но ярче, что обусловлено фокусировкой части РЭП в данном месте. Найдём соотношение между этими двумя светимостями по измеряемой освещённости изображения.

Максимальный обзор по горизонтали (см. рис. 3) ограничивается геометрическими размерами канала щелевой развёртки и составляет $b = 34$ мм. Обычно электронный пучок экспонирует меньшую, чем указанная, ширину, и за b принимается размер, взятый из изображения объекта через обскуру (обзор обскуры составляет круг диаметром 40 мм). Освещённость изображения B_1 , включающего в себя фокусное пятно, будет равна

$$B_1 = G[(b - a_1)I_2 + a_1I_1],$$

где G — геометрический коэффициент с размерностью см^{-1} ; I_1 и I_2 — светимость фокусного пятна и остальной площади соответственно. Освещённость соседнего участка изображения, не включающего в себя фокусное пятно, равна $B_2 = GbI_2$. Поскольку $B_1 = kB_2$, где k — измеряемая величина, то

$$I_1 = [b/a_1(k - 1) + 1]I_2. \quad (1)$$

Эта оценка светимости I_1 есть оценка снизу, так как вклад РЭП в анодную фольгу неоднороден и обычно спадает на периферии.

В каждый момент времени на щелевой развёртке представлено распределение по выбранной координате полного свечения обзореваемой области. Интегрируя освещённость изображения по этой координате, получается полное свечение анодной фольги и, согласно декларируемой пропорциональности тока и свечения фольги в мягком рентгеновском излучении, полный ток РЭП. Части тока Δ в фокусном пятне соответствует часть этого интеграла по сопряжённому с ним изображению, но скорректированная в соответствии с приведённой формулой (1). Корректировка следующая: в фокусном пятне со светимостью I_1 в рассматриваемый на развёртке момент времени находится часть от тока Δ , равная

$$\Delta = a_1I_1/[a_1I_1 + (b - a_1)I_2] = 1 - (b - a_1)/b/k. \quad (2)$$

Итак, размер фокусного пятна РЭП в вертикальном направлении определяется по щелевой развёртке в интервал времени, соответствующий времени ускорения ионов, в горизонтальном направлении размер берётся из интегрального по времени изображения, сделанного камерой-обскурой. По полученным на щелевой развёртке значениям освещённости изображения фокусного пятна РЭП на анодной фольге и на его периферии, а также по площади фокусного пятна определяется часть тока РЭП, которая приходит в фокусное пятно, и плотность этого тока.

ЭКСПЕРИМЕНТ СО ЩЕЛЕВОЙ РАЗВЁРТКОЙ

В качестве иллюстрации действия разработанной методики рассмотрим один из пусков на генераторе РЭП «Катран» (напряжение в импульсе ~ 300 кВ, ток ~ 120 кА, длительность импульса ~ 100 нс), где для диагностики использовались камера-обскура, щелевая развёртка и ВРД времяпролётного спектрометра, расположенные вблизи оси на удалении 143 и 182 см.

На рис. 4 собраны вместе сориентированные и масштабированные друг относительно друга два изображения, сделанные обскурой и щелевой развёрткой, и изображение осциллограмм, синхронизованное со щелевой развёрткой. Моменты прихода ионов на один из детекторов отмечены зелёными штрихами.

Рис. 4. Сводные результаты пуска: *а* — цветовая шкала освещённости на обоих изображениях; *б* — осциллограммы напряжения (—, кВ/100, предымпульс 50 кВ), электрического тока (—, инвертирован, кА/50) и детектора ВРД (—), нулевые линии смещены; *в* — полученное камерой-обскурой рентгеновское изображение экспонируемой электронным пучком анодной фольги, масштабированное и сориентированное вдоль щелевой развёртки; *г* — линейная щелевая развёртка, синхронизованная с осциллограммами

Как показывает эксперимент, дистанция, на которой происходит ускорение ионов, составляет несколько миллиметров. В связи с этим момент набора скорости ионов рассчитывался из времяпролётной диагностики по формуле $t_0 = t_{\text{ВРД}} - L/V$, где L — расстояние от анодной фольги до ВРД; $t_{\text{ВРД}}$ — время прихода ионного импульса на датчик ВРД; V — скорость ионов, рассчитанная по известной базе между двумя детекторами и задержкой времени регистрации импульсов ионов на них. Эти моменты набора скорости t_0 трёх сгустков ионов отмечены тремя красными штрихами сверху на рис. 4, *б*. Непосредственно в эти моменты времени щелевая развёртка зарегистрировала фокусировку РЭП, продолжавшуюся единицы наносекунд и демонстрирующую кратковременность существования условий для ускорения ионов и малую длину дистанции, на которой происходит

ускорение. В данном эксперименте зарегистрированы ионы алюминия энергией 5,75 и 6,35 МэВ соответственно, поскольку более лёгкие ($Z < 10$) ионы, имеющие измеренную скорость и присутствующие в поверхностном слое алюминиевой фольги-анода, не проникают сквозь лавсан толщиной 4,8 мкм, размещённый в качестве фильтра перед ВРД.

Рис. 5. Профиль освещённости изображения фольги в момент ускорения ионов: - - - — уровень фона

По интегральному по времени изображению, получаемому камерой-обскурой, ширина фокусного пятна на полувысоте освещённости составляет $a_1 \approx 13$ мм. Поскольку в рассматриваемом эксперименте зарегистрировано три ионных пика, которые в соответствии с обскурограммой могут быть обусловлены фокусировкой РЭП в разных местах анодной фольги, но находятся на одной и той же высоте на щелевой развёртке, то данная оценка площади будет завышенной и оценка по плотности тока для каждого ионного сгустка заниженной. Полный обзор в горизонтальном направлении составляет $b = 34$ мм по объекту.

На рис. 5 представлен срез на изображении развёртки в момент ускорения первого сгустка ионов максимальная освещённость в этом срезе на фокусном пятне $B_1 = 166$.

Линейный размер фокусного пятна над штриховой линией составляет $a_1 = 4$ мм. Освещённость соседнего с фокусом протяжённого участка не превышает значения $B_2 = 152$. Таким образом, $k = B_1/B_2 = 1,09$.

Интегрируя свечение первый раз по фокусному пятну и второй по всей видимой области и взяв их отношение по формуле (2), можно определить искомую часть тока $\Delta_1 = 0,294[1 - (b - a_1)/b/k] = 0,127$. Площадь фокусного пятна, предполагаемого эллипсом, составляет $S = \pi/4 a_1 a_2 = 0,41$ см². При значении полного электрического тока РЭП в данный момент $i_1 = 55$ кА плотность тока в фокусном пятне получается равной $\sigma_1 = i\Delta/S = 17$ кА/см². Аналогичные расчёты для второго момента, при котором полный электрический ток $i_2 = 38$ кА и в который ускорился второй сгусток ионов, дают $\Delta_2 = 0,27[1 - (b - a_1)/b/k] = 0,11$ и $\sigma_2 = 14,5$ кА/см².

Полученные плотности тока сравнивались с оценками, сделанными по интегральному изображению обскуры. Интегральное по времени значение площади на половинном уровне освещённости фокусного пятна равно 0,97 см². Если традиционно считать, что половина тока идёт через эту площадь, то средняя плотность тока в момент первого ускорения составляет $\sigma_1 = 0,5 \cdot 55 / 0,97 = 28$ кА/см², во второй момент $\sigma_2 = 19,3$ кА/см². Оба эти значения получаются существенно завышенными из-за того, что в эксперименте большая часть тока РЭП проходит вне фокусного пятна. Если проинтегрировать освещённость по этой площади (0,97 см²), а также по всему изображению сцинтиллятора и взять их отношение, то доля полного тока в фокусном пятне получится равной 0,15. Плотность тока в два рассматриваемых момента составит $\Sigma_1 = 0,15 \cdot 55 / 0,97 = 8,5$ кА/см² и $\Sigma_2 = 5,9$ кА/см². Она оказывается в рассматриваемом эксперименте в 2—2,5 раза меньше плотности тока, полученной с использованием целевой развёртки. Преимущество времязадающей диагностики состоит в большей надёжности измерений, поскольку в ней имеется неопределённость в размере фокусного пятна только по одной из координат в отличие от интегральной по времени фотографии, где неопределённость имеется по двум координатам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании ускорения ионов в амбиполярном поле плазмы анодной фольги было обнаружено ускорение нескольких сгустков ионов в одном пуске, вследствие чего интегрального по времени изображения с камеры-обскуры оказалось недостаточно для корректного измерения плотности электронного тока на анодной фольге. Для наблюдения за плотностью тока РЭП во времени была разработана диагностика с использованием целевой развёртки на основе электронно-оптической камеры K008. Щелевое изображение анодной фольги конвертировалось из мягкого рентгеновского излучения в свет на тонком сцинтилляторе и регистрировалось с временным разрешением ≈ 5 нс и пространственным разрешением $\approx 0,2$ мм.

Методика была успешно протестирована и в настоящее время используется при исследовании механизма ускорения ионов в импульсном генераторе РЭП. Она позволяет дать более корректную оценку для плотности тока сфокусированного электронного пучка, перемещающегося по анодной фольге, по сравнению с интегральными по времени измерениями. Плотность тока, полученная с помощью новой диагностики, оказывается в ≈ 2 раза больше по сравнению с интегральными по времени измерениями. Эта методика позволит установить функцию эффективности ускорения ионных сгустков в вакууме в зависимости от плотности тока РЭП на тонком фольговом аноде.

Авторы выражают благодарность Ю.Г. Калинину за полезные советы и обсуждения при разработке новой методики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00199мол_а.

REFERENCES

1. Dubinov A.E., Kornilova I.Yu., Selemir V.D. Ions collective acceleration in systems with a virtual cathode. — UFN (APhS), 2002, vol. 172, issue 11, pp. 1225—1246; doi: 10.3367/UFNr.0172.200211a.1225 (in Russian).

2. **Gorbun Yu.M., Dan'ko S.A., Kalinin Yu.G., Skoryupin V.A., Shestakov Yu.I., Yan'kov V.V.** On the acceleration mechanism of anode foil ions irradiated by REB. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1980, vol. 6, issue 1, pp. 109—113 (in Russian).
3. **Vereshchaka A.S.** Productivity of a cutting tool with a wear-resistant coating. — M.: Mashinostroenie (Machine-building), 1993. 336 p. (in Russian).
4. **Belozerov O.S., Bakshaev Yu.L., Dan'ko S.A.** Experiments on ions acceleration in the diode of REB generator «Kalmar». — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2019, vol. 45, issue 6, pp. 538—546; DOI: 10.1134/S0367292119060027 (in Russian).
5. **Belozerov O.S., Bakshaev Yu.L., Dan'ko S.A.** Diagnostic techniques in the experiment on ion acceleration in REB generators. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2018, vol. 41, issue 4, pp. 99—105; doi: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-99-105 (in Russian).
6. **BIFO Company.** URL: <https://bifocompany.com> (reference date 14.02.2020).
7. **Anan'ev S.S., Dan'ko S.A., Myalton V.V., Kalinin Yu.G., Krauz V.I., Vinogradov V.P., Vinogradova Yu.V.** Investigation of the pulsed plasma flow, generated in non-cylindrical Z-pinch systems, by electron-optical methods. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2013, vol. 36, issue 4, pp. 102—110; http://vant.iterru.ru/vant_2013_4/11.pdf (in Russian).

AUTHORS

Belozerov O.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; OSBelozerov@yandex.ru

Dan'ko S.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Danko_SA@nrcki.ru

Ananyev S.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Ananyev_SS@nrcki.ru

Received 20 February 2020

Revised 23 March 2020

Accepted 15 May 2020

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2020, vol. 43, issue 2, pp. 80—86