

04:07:12

Получение спектрально-селективных рентгеновских изображений плазмы неона с временным разрешением на установке плазменный фокус SPEED2

© С.В. Бобашев, Д.М. Симановский, Г. Деккер, В. Кис,
П. Рёвекамп, Х. Золь, У. Бернтин

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург
Университет им. Генриха Гейне, Дюссельдорф, Германия

Поступило в Редакцию 27 декабря 1996 г.

В работе проведено исследование динамики пинчевания плазмы неона на установке SPEED2 путем регистрации спектрально-селективных рентгеновских изображений плазмы с высоким пространственным и временным разрешением. Получены серии изображений плазменного фокуса в линиях излучения водородо- и гелиеподобных ионов неона на длинах волн $\lambda = 1.21$ нм и $\lambda = 1.35$ нм на различных стадиях сжатия плазмы. Подтвержден устойчивый характер разряда в плазме неона. Установлено, что на заключительной стадии пинчевания средняя зарядность ионов неона быстро увеличивается от +9 до +10 и по достижении диаметра пинча менее 1 мм плазма становится полностью ионизованной.

В данной работе проведено исследование ионного состава плазмы неона на установке SPEED2 путем регистрации рентгеновских изображений плазмы с временным разрешением в линиях излучения водородо- и гелиеподобных ионов неона.

Установка SPEED2 является мощным электрическим драйвером, предназначенным для создания и сжатия плазмы конфигурации "плазменный фокус". Он обеспечивает время нарастания тока (четверть периода) $\tau = 400$ нс и максимальный ток в разряде 2 МА при начальном напряжении до 300 кВ [1]. Первоначально SPEED2 был спроектирован для проведения термоядерных исследований и рассчитан для работы с плазмой дейтерия. В последнее время было продемонстрировано, что данная установка может быть использована для генерации рентгеновского излучения путем инъекции инертных газов в прианодную

область дейтериевого разряда. В результате динамической компрессии инжектированного газа сжимающейся дейтериевой оболочкой происходит формирование на заключительной стадии разряда высокоионизованной плотной плазмы, являющейся интенсивным источником мягкого рентгеновского излучения [2].

На установке SPEED2 исследовались разряды с аргоном и неоном в качестве инжектируемых газов. Было обнаружено, что динамика пинчевания и пространственная структура образующейся плотной плазмы существенно отличаются для разрядов с Ar и Ne.

В разрядах с инъекцией Ar, выполнявшихся при типичных значениях напряжения 180 кВ и максимальном токе 1.5 МА, на заключительной стадии динамической компрессии наблюдалось развитие сильной рэлей-тейлоровской неустойчивости плазмы ($m = 0$), приводящей к образованию так называемых микропинчей, являющихся результатом радиационного коллапса [3,4]. При этом, как установлено в работе [2], значительная часть испущенного плазмой рентгеновского излучения (десятки джоулей) приходится на долю именно микропинчей.

Иная картина наблюдалась в разрядах с инъекцией Ne, для которых характерно образование устойчивого однородного пинча без каких-либо признаков развития радиационного коллапса. Это можно, по-видимому, объяснить тем, что на конечной стадии сжатия происходит полная ионизация Ne (до ядер), приводящая к уменьшению скорости радиационных потерь и тем самым предотвращающая развитие радиационного коллапса и образование микропинчей.

Для проверки данного предположения и определения пространственного распределения ионов Ne в плазме на конечной стадии сжатия регистрировались изображения плазмы в линиях излучения водородо- и гелиеподобных ионов неона, соответствующих переходам $1s-2p$ ($\lambda = 1.21$ нм) в ионе Ne^{10+} и $1s^2-1s2p$ ($\lambda = 1.35$ нм) в ионе Ne^{9+} . Применение стробируемого по времени детектора изображения позволило получить изображения, соответствующие различным фазам сжатия плазмы.

Для построения изображений плазмы нами был использован рентгенооптический прибор на базе цилиндрических многослойных рентгеновских зеркал в параллельной конфигурации [5]. Оптическая схема прибора, присоединенного к экспериментальной установке, показана на рис. 1. Его основным оптическим элементом является поворотный узел многослойных зеркал, который служит одновременно для фокусировки

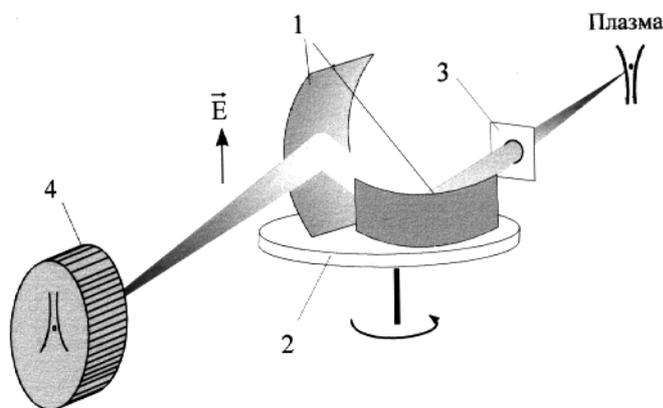


Рис. 1. Оптическая схема изображающего прибора, присоединенного к экспериментальной установке: 1 — цилиндрические многослойные рентгеновские зеркала, 2 — поворотный узел зеркал, 3 — фильтр, 4 — детектор изображения.

и монохроматизации излучения. Фокусирующие свойства такой системы, в которой излучение последовательно отражается от двух близко расположенных зеркал, цилиндрически изогнутых по радиусам $R1$ и $R2$ во взаимно перпендикулярных плоскостях, практически эквивалентны фокусирующим свойствам одного сферического зеркала. При этом первое цилиндрическое зеркало фокусирует излучение в меридиональной плоскости, а второе — в сагиттальной. Основным достоинством такой установки оптических элементов является возможность плавного изменения рабочей длины волны путем поворота фокусирующего элемента вокруг своей оси.

Расстояние между цилиндрическими зеркалами составляло 1.6 см и было много меньше фокусного расстояния системы $-F = 50$ см. Такое соотношение позволило воспользоваться упрощенными формулами из работы [6] для определения радиусов кривизны зеркал:

$$R1 = 2F / \sin \vartheta, \quad (1)$$

$$R2 = 2F \sin \vartheta, \quad (2)$$

где F — фокусное расстояние системы, а ϑ — угол падения излучения на зеркало. Для работы в области длин волн 1.21–1.35 нм в ИФМ РАН были

изготовлены многослойные рентгеновские зеркала на основе пары W–Sc с периодом структуры $d = 1.18$ нм, нанесенные на кремниевые подложки размером $0.5 \times 20 \times 50$ мм. Коэффициент отражения одного зеркала на рабочих длинах волн 1.21–1.35 нм составлял 0.7%. Спектральное разрешение после двух отражений достигало величины $\lambda/\Delta\lambda \approx 150$, что дало возможность уверенно разделять спектральные линии H- и He-подобных ионов неона. Рабочий диапазон углов падения излучения на многослойные рентгеновские зеркала лежал в интервале $31\text{--}35^\circ$. При таких углах падения излучения на зеркале радиусы кривизны зеркал, определенные по формулам (1) и (2), составляли соответственно $R1 \approx 1.8$ м, $R2 \approx 0.5$ м.

Расстояние от фокусирующих зеркал (1) до плазмы составляло 1.2 м (рис. 1). Столь большое расстояние было необходимо для защиты вакуумно-плотного фильтра (3), разделявшего изображающую систему и разрядную камеру, от воздействия ударной волны и излучения. Фильтром служила лавсановая пленка (Makrofol KD) толщиной 1.5 мкм, покрытая с обеих сторон слоями алюминия толщиной 0.15 мкм. Фильтр был необходим для защиты детектора от мягкого вакуумно-ультрафиолетового излучения разряда, которое могло отражаться от многослойного рентгеновского зеркала неселективно, а также для отделения высоковакуумного объема изображающей системы (10^{-5} Тор) от разрядной камеры, заполнявшейся дейтерием до давления 3–4 Тор.

Изображения плазмы регистрировались при помощи стробируемого детектора на микроканальных пластинах (4). Для получения изображения в определенный момент времени на микроканальный детектор подавался импульс напряжения амплитудой 5 кВ и длительностью 3 нс. Напряжение делилось между шевронной сборкой микроканальных пластин (1.5 кВ) и ускоряющим промежутком перед люминесцентным экраном (3.5 кУ), нанесенным на волоконно-оптическую пластину. Преобразованное в видимый свет изображение регистрировалось высокочувствительной фотопленкой Fuji Neoran 1600, прижимавшейся непосредственно к поверхности волоконно-оптической пластины.

Пространственное разрешение, которое обеспечивала изображающая система, определялось прежде всего абберациями фокусирующей оптики и разрешающей способностью детектора. Определенное экспериментально, оно составляло 80 мкм. В ряде случаев, при регистрации изображений плазмы в слабых линиях излучения, реально достигнутое

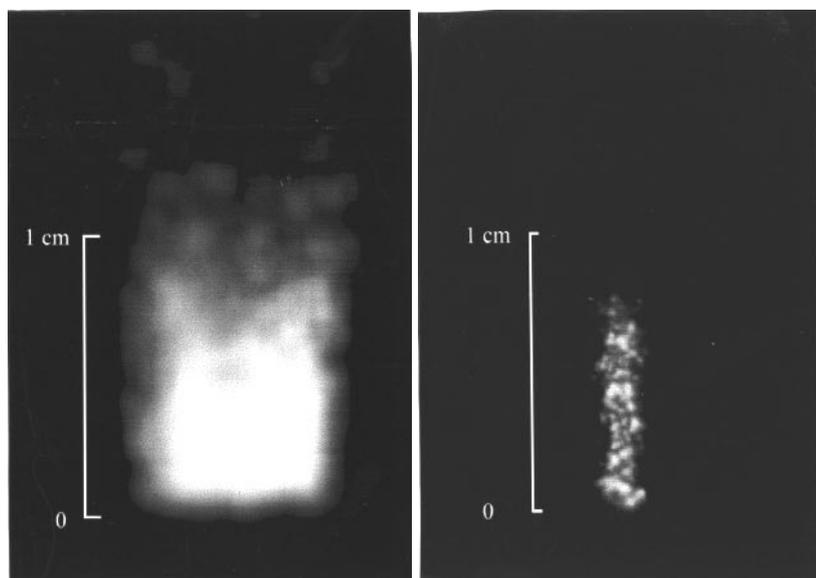


Рис. 2. Изображение плазмы неона на длине волны: *a* — 1.35 нм, *б* — 1.21 нм.

разрешение было ниже и определялось статистической природой полученных изображений.

Основная трудность при проведении измерений состояла в том, что временной разброс момента пинчевания, составлявший около 50 нс, в несколько раз превышал как временное окно детектора (3 нс), так и время существования плотной плазмы (~ 15 нс). В серии экспериментов из более чем 100 разрядов, проведенных с использованием изображающей системы, было получено около 20 удачных фотографий плазмы неона на различных стадиях сжатия в линиях 1.21 и 1.35 нм. Все разряды были проведены при начальном напряжении драйвера 180 кВ и запасенной энергии 70 кДж.

Полученный ряд изображений плазмы на длине волны 1.35 нм ($1s^2-1s2p$, Ne^{9+}) позволил проследить динамику пинчевания, начинающегося вблизи поверхности анода и развивающегося далее вдоль оси Z . Типичная фотография плазмы в момент максимальной светимости

вблизи анода представлена на рис. 2, а. Полученные результаты свидетельствуют, что процесс пинчевания распространяется вдоль оси Z от поверхности анода со скоростью $\sim 10^8$ см/с и излучение плазмы на данной длине волны уверенно регистрируется на расстояниях до 3 см от поверхности анода. При этом протяженность излучающей области пинча в каждый момент времени не превышала 1 см, а ее диаметр был не менее 4 мм. Столь большой диаметр излучающей области свидетельствует о том, что плазма достигает степени ионизации, характеризующейся значительной концентрацией гелиеподобных ионов на достаточно ранней стадии пинчевания. По мере дальнейшего сжатия и нагрева плазмы концентрация гелиеподобных ионов падает, о чем свидетельствует отсутствие их излучения из плазмы диаметром менее 3 мм.

Изображения плазмы на длине волны 1,21 нм ($1s-2p$, Ne^{10+}) показывают, что диаметр плазменного пинча с высокой концентрацией водородоподобных ионов составляет около 1 мм. Это свидетельствует о том, что в процессе сжатия от 4 до 1 мм средняя зарядность ионов плазмы увеличивается от Ne^{9+} до Ne^{10+} и при дальнейшем сжатии плазма становится полностью ионизованной, содержащей ядра Ne^{11+} и свободные электроны.

Полученные результаты подтверждают предположение о снижении скорости радиационных потерь плазмы неона при глубоком сжатии вследствие полной ионизации плазмы. Разработанная методика получения изображений плазмы будет применена для дальнейшего исследования механизма устойчивого пинчевания, приводящего к образованию пространственно-однородной плотной плазмы.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Салашенко за предоставленные уникальные рентгеновские зеркала. Проведение настоящей работы стало возможно благодаря гранту НАТО CRJ 950937.

Список литературы

- [1] *Decker G., Kies W., Malzig M., van Calker C., Ziethen G.* // Nucl. Instrum. Methods. 1986. **A249**. P. 477.
- [2] *Platonov Yu.Ya., Salashchenko N.N., Simanovskii D.M., Roewekamp P., Decker G., Kies W.* // Short living plasma and its diagnostics. Prague. 1995. P. 122–127.
- [3] *Decker G., Kies W., Nadolny R., Roewekamp P., Schmitz F., Ziethen G., Koshelev K.N., Sidelnikov Yu.V., Sopkin Yu.V.* // Plasma Sources Sci. Techn. 1996. V. 5(1). P. 112–115.
- [4] *Koshelev K.N., Pereira N.R.* // J. Appl. Phys. 1996. V. 69. P. R21.
- [5] *Bobashev S.V., Simanovskii D.M., Platonov Yu.Ya., Roewekamp P., Decker G., Kies W.* // Plasma Sources Sci. Techn. 1996. V. 5(3). P. 578–581.
- [6] *Чен Т., Бушурев В.А., Кузьмин Р.Н.* // ЖТФ. 1990. Т. 60(10). С. 60–63.