

## Cluster synthesis of light nuclei such as D+D

V. Yu. Velikodnyi

Institute of Applied Mechanics RAS, Moscow, Russia

V. A. Bityurin

Institute High Temperature RAS, Moscow, Russia

*In series experimental works in which interaction heavy-water clusters, accelerated to a total energy of the order of 300 keV, with deuterated targets (TiD) was examined, the "anomalous" high yields the products of reaction  ${}^2\text{D} + {}^2\text{D}$  under increasing sizes clusters was revealed. Authors this work showed, that "anomalous" high yields products of the reaction  ${}^2\text{D} + {}^2\text{D}$  under increasing a clusters sizes connected with non-equilibrium effects arise from collective interaction  ${}^2\text{D}$  with heavy atoms — O, Ti by Fermi mechanism. On the basis experimental data and theoretical results the method of realization the process of synthesis of light nuclei with speed closed to maximum value under relatively low average energy for one nuclon in cluster  $\sim 0.005\text{--}0.8$  keV was proposed.*

УДК 533.9.082

## Применение импульсной времяпролетной рефрактометрии для измерения средней плотности плазмы на токамаке Т-11М

А. А. Петров, В. Г. Петров

Государственный научный центр РФ "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), г. Троицк Московской обл., Россия

*Реализован новый метод измерения средней плотности плазмы в установках с магнитным удержанием плазмы — метод импульсной времяпролетной рефрактометрии (ИВР) плазмы. Метод основан на измерении времени распространения коротких микроволновых импульсов, прошедших через плазму. При зондировании плазмы обыкновенной волной с частотой несущей, много большей плазменной частоты, время задержки импульса за счет плазмы пропорционально среднехордовой электронной плотности и не зависит от профиля плотности. Основная проблема при проведении таких измерений — малая точность измерения времени задержки — решалась при разработке импульсного времяпролетного рефрактометра на токамаке Т-11М. Описаны экспериментальные результаты, полученные с помощью прибора.*

В настоящее время имеется достаточное количество задач физических исследований на токамаках, выполнение которых требует надежных измерений плотности плазмы (исследование срывов, режимы с быстрым нарастанием плотности с нелет-инжекцией, МГД-колебания, режимы с длинным импульсом и т. п.). Обычные фазовые интерферометры не в полной мере отве-

чают этим требованиям вследствие фазовых “сбоев”. Поэтому задача разработки надежных и простых методов измерения плотности плазмы представляется достаточно актуальной.

В настоящей работе предложено использовать метод ИВР плазмы, описанный в [1], для измерений среднехордовой электронной плотности. Это, по сути, импульсный рефлектометр, работающий в режиме на “просвет”, когда несущая частота зондирующей волны много больше плазменной частоты. В этом случае измеряемое время распространения микроволнового импульса в плазме оказывается пропорциональным линейной плотности по хорде зондирования, и, таким образом, обеспечивается однозначная связь между измеряемой величиной и линейной плотностью.

### Физические основы ИВР

В ИВР для получения информации о средней по хорде зондирования плотности электронов используется импульсный микроволновой радар-рефлектометр, работающий в режиме “на просвет”, когда частота несущей зондирующей волны превышает плазменную частоту. Режим импульсного времяпролетного рефрактометра наблюдался в экспериментах по импульсной рефлектометрии на токамаках Т-11М и RTP в начале разряда и на спаде тока, когда плотность плазмы достаточно мала [1, 2]. В работе [1] метод ИВР предлагался для измерения средней плотности и профиля плотности плазмы на ITER, а в работе [2] — для коррекции измерений профиля плотности при рефлектометрических измерениях. Приведем краткое описание физических основ методики, изложенных в [1].

Как известно, при зондировании плазмы электромагнитной волной с частотой, большей, чем плазменная частота, волна, пройдя через плазму, испытывает сдвиг фазы, определяемый уравнением [3]

$$\Phi_{o,e}(\omega, x) = \frac{\omega}{c} \int_l \eta_{o,e}(\omega, x, z) dz,$$

где  $\omega$  — циклическая частота волны;

$c$  — скорость света;

$l$  — длина хорды зондирования;

$\eta_{o,e}$  — показатель преломления плазмы; индексы  $o$  и  $e$  относятся к обыкновенной и необыкновенной волне, соответственно;

$x$  и  $z$  — горизонтальная и вертикальная координаты.

Обычно зондирование на обыкновенной волне предпочтительнее, так как в этом случае результат не зависит от магнитного поля

$$\eta_o(\omega, x, z) = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2(x, z)}{\omega^2}},$$

где  $\omega_p(x, z) = 89,8 \sqrt{n(x, z)}$  — плазменная частота, ГГц;

$n(x, z)$  — электронная плотность,  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>.

Тогда на выходе из плазмы прошедший сигнал будет иметь временную задержку (групповое время задержки)

$$\tau_{gr}(x) = \frac{\partial \Phi(\omega, x)}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} = \frac{1}{c} \int_l \eta_0(\omega, x, z) dz + \frac{\omega}{c} \int_l \frac{\partial \eta_0}{\partial \omega}(\omega, x, z) dz. \quad (1)$$

В этом случае при параболическом распределении плотности имеем

$$\tau_{gr} = \frac{a \omega}{c \omega_p(0)} \ln \frac{\omega + \omega_p(0)}{\omega - \omega_p(0)}.$$

В пределе

$$\omega \gg \omega_p(0) \quad (2)$$

выражение для времени задержки приобретает вид

$$\tau_{gr} = \frac{2a}{c} \frac{1 + \omega_p^2(0)}{3\omega^2},$$

т. е. изменение времени распространения микроволнового импульса из-за плазмы (время задержки импульса в плазме) пропорционально линейной плотности  $\langle n l \rangle$ ,  $l = 2a$  и обратно пропорционально квадрату частоты несущей зондирующей волны  $f$

$$\tau'_{pl} = \tau_{gr} - 2a/c = (2a/3c) (\omega_p(0)^2/\omega^2) = \gamma \langle n l \rangle / f^2, \quad (3)$$

где  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности и  $f = \omega/2\pi$ .

Нетрудно показать из (1), что при выполнении условия (2) выражение (3) справедливо для любого профиля плотности.

На рис. 1 показана зависимость времени задержки микроволнового импульса в плазме от частоты несущей зондирующей волны для разных профилей плотности вида  $N(r) = N_0(\beta)(1-r/a)^\beta$ ,  $\beta = 0,3; 1; 3$ . Средняя плотность во всех случаях одинакова и равна  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Зависимость результата измерений от профиля пренебрежимо мала для частот выше 180 ГГц, но при этом время задержки меньше 0,2 нс. Для увеличения точности измерений можно применять зондирование на двух частотах, при этом измерения на более низкой частоте дают среднюю плотность в режиме низких плотностей. На рис. 2, а показана аналогичная рис. 1 зависимость времени задержки от частоты для режима низких плотностей  $\langle n \rangle = 0,67 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 2, б показана калибровочная кривая ИВР в этом режиме для несущей частоты 60 ГГц. В пределах 10 % результат не зависит от профиля.

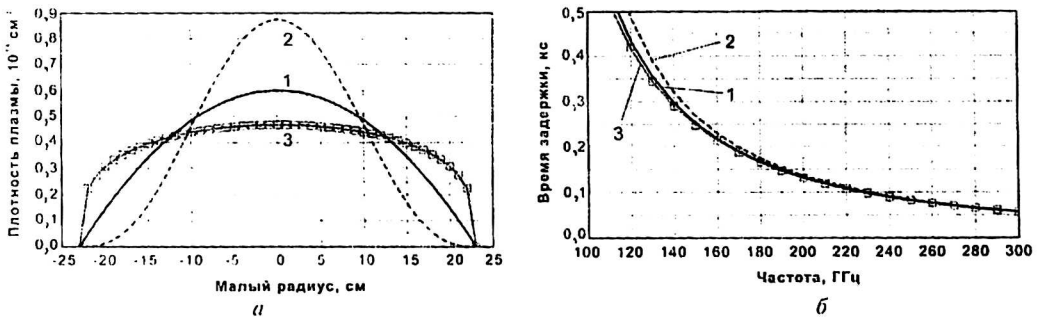
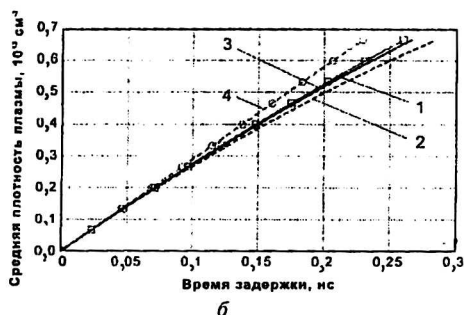
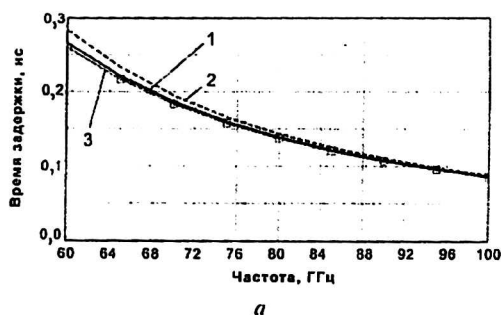


Рис. 1. Профили плотности, использованные для расчетов (а); зависимость времени задержки ИВР от несущей частоты зондирующей волны в режиме номинальной плотности ( $\langle n \rangle = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) для разных профилей плотности (б): 1 — параболический профиль,  $\beta = 1$ ; 2 — обостренный профиль,  $\beta = 3$ ; 3 — расширенный профиль,  $\beta = 0,3$



**Рис. 2.** Зависимость времени задержки ИВР от несущей частоты в режиме с низкой плотностью ( $\langle n \rangle = 0,67 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) (а); зависимость между средней плотностью и временем задержки ИВР в этом режиме для разных профилей плотности (б): 1 — параболический профиль,  $\beta = 1$ ; 2 — обостренный профиль,  $\beta = 3$ ; 3 — расширенный профиль,  $\beta = 0,3$ ; 4 — профиль, рассчитанный по формуле (3)

Еще один способ улучшения точности измерений — повышение частоты повторения зондирующих импульсов с последующим статистическим усреднением по  $N$  измерениям; в этом случае ошибки измерений уменьшатся в соотношении  $N^{-0,5}$ , а временное разрешение при измерениях плотности плазмы ухудшится как  $N$  [1].

### Эксперименты с ИВР на токамаке Т-11М

Токамак Т-11М ( $a = 20 \text{ см}$ ,  $R = 70 \text{ см}$ ,  $\langle n \rangle = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $I_p = 100 \text{ кА}$ ,  $B_T = 1,2 \text{ Т}$ ) в последнее время был модернизирован в целях создания на нем оптимальных условий для проведения экспериментов с мощным (2 МВт) ионно-циклотронным (ИЦ)-нагревом. Модернизация заключалась в удалении медного кожуха из вакуумной камеры, введении в строй систем равновесия плазменного шнура по вертикали и по горизонтали, а также в усовершенствовании системы питания индуктора в целях увеличения длительности ряда.

Для проверки предложенной методики был разработан прототип ИВР на несущей частоте 60 ГГц с выходной мощностью ~100 мВт в целях применения его в качестве монитора средней электронной плотности на токамаке Т-11М в режиме низких плотностей (рис. 3). Зондирование осуществлялось в экваториальной плоскости с отражением излучения от внутренней стенки токамака. Для измерений вертикального смещения шнура были установлены два идентичных приемных канала, разнесенных в полоидальном направлении (второй канал на рис. 3 не показан). В каждом из приемных каналов применены два детектора, что позволило исключить влияние на измеряемое время задержки нестабильности момента времени пробоя лавинно-пробойного диода (ЛПД) при подаче на последний импульс тока. При таком подходе первый импульс привязки схемы измерения времени задержки (сигнал “Старт”) формируется по сигналу детектора Д1, а второй — по сигналу детектора Д2. При этом методы формирования импульсов “Старт” и “Стоп” из сигналов, поступающих с детекторов Д1 и Д2, соответственно, идентичны, что позволяет минимизировать возможные ошибки привязки и существенно (до ~5 пс) улучшить точность измерения времени задержки.

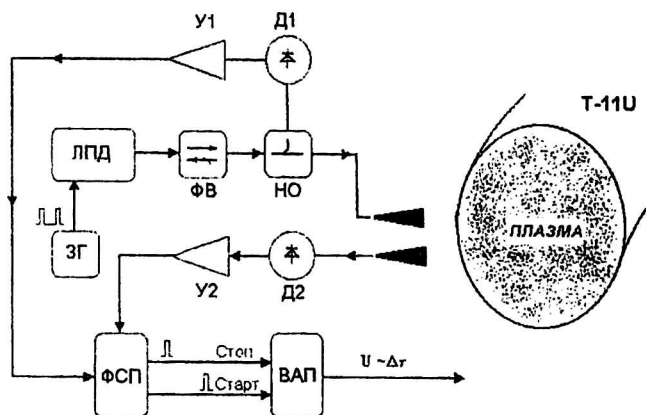


Рис. 3. Схема экспериментов с ИВР на токамаке Т-11М:

ЛПД — генератор микроволновых импульсов на ЛПД; ЗГ — задающий генератор;  
 ФВ — ферритовый вентиль; НО — направленный ответвитель (-20 дБ);  
 Д1 и Д2 — детекторы опорного и сигнального каналов, соответственно;  
 У1 и У2 — усилители опорного и сигнального каналов; ФСП — формирователь  
 импульсов со следящим порогом; ВАП — преобразователь время—амплитуда

Перед установкой на токамак была проведена калибровка прибора на стенде. В качестве отражающей мишени при этом использовался металлический цилиндр диаметром ~15 см. Сигнал с выхода ВАП измерялся с помощью цифрового вольтметра при времени интегрирования ~1 с. Полученная калибровочная кривая рефрактометра представлена на рис. 4. Собственное разрешение прибора составляет около 5 пс при измерениях на стенде, минимальное смещение мишени, регистрируемое прибором, — около 1 мм.

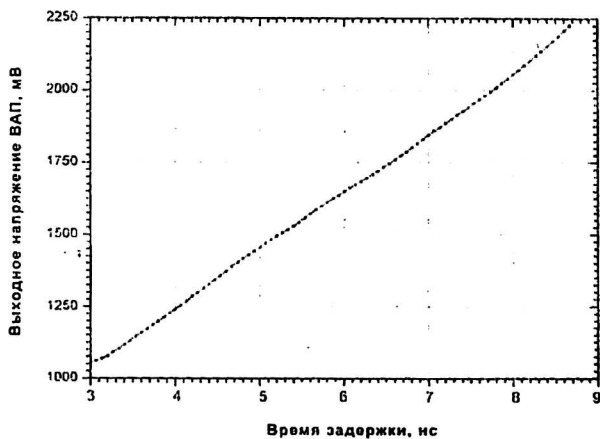


Рис. 4. Калибровочная кривая ИВР, полученная на стенде

Чувствительность ИВР с двумя приемными каналами к вертикальным смещениям шнура определяется соотношениями:

$$z_h < \xi a^2 / 2h \quad (\text{при однородном профиле плотности});$$

$$z_p < \xi a^2 / 6h \quad (\text{при параболическом профиле плотности}),$$

где  $\xi = 2(n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)$  — минимальная измеримая плотность в относительных единицах ( $n_1, n_2$  — сигналы, пропорциональные линейным плотностям вдоль 1-й и 2-й хорд наблюдения, соответственно);  $2h$  — расстояние между приемными антеннами по вертикали (на Т-11М,  $2h = 6$  см).

Как показали эксперименты на Т-11М, минимальная измеримая плотность с помощью ИВР составляет  $n_{\min} = 0,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , соответственно  $\xi \sim 0,1$

при средней плотности  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $z_p < 2 \text{ см}$ . Для средней плотности  $10^{13} \text{ см}^{-3}$   $\xi = -0,02$  и  $z_p < 0,4 \text{ м}$ .

Во время экспериментов на токамаке Т-11М одновременно производились измерения электронной плотности с помощью “бессбойного” поляризационного интерферометра (зондирование по вертикали).

На рис. 5 показаны данные ИВР и интерферометра для разряда № 14444, там же приведен сигнал датчика вертикального положения шнура. Собственный шум рефрактометра без плазмы соответствует минимальной измеримой плотности  $-0,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при временном разрешении 2–3 мс. Следовательно, точность измерений плотности с помощью ИВР составила примерно 2 % в максимуме плотности.

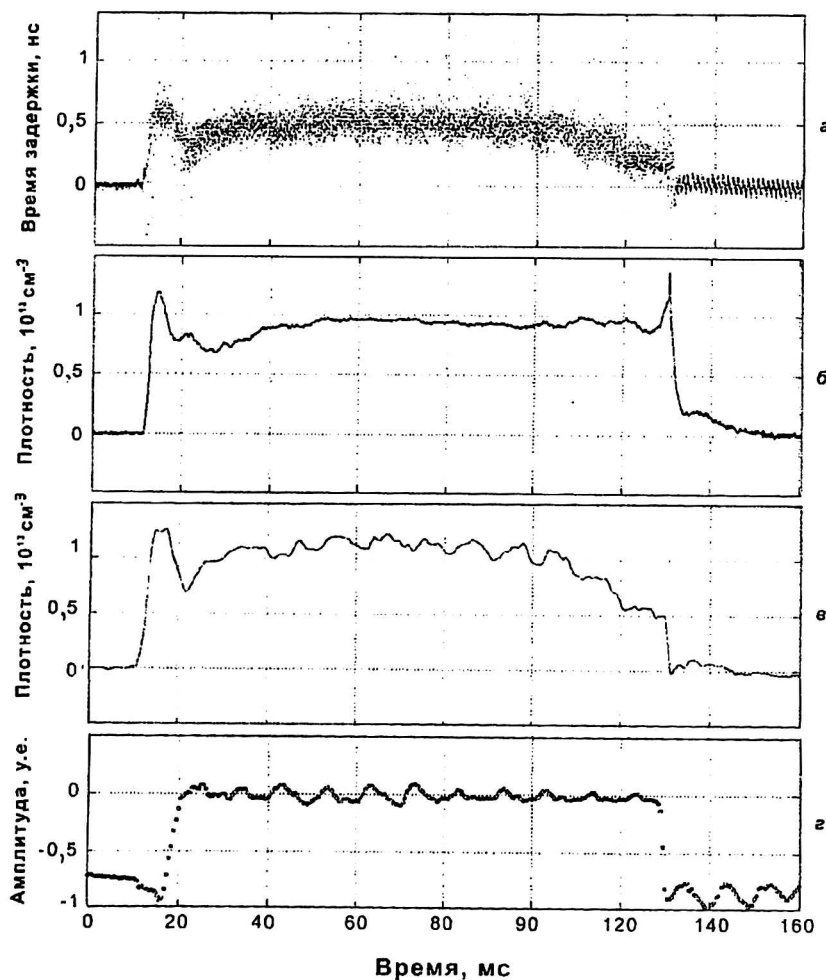


Рис. 5. Данные для разряда № 14444:

а — “сырые” данные ИВР; б — временная эволюция средней плотности в течение разряда, измеренная интерферометром; в — временная эволюция средней плотности, измеренная ИВР; г — сигнал вертикального отклонения с магнитного датчика

На рис. 6 показаны сигналы двух каналов ИВР и сигнал с магнитного датчика вертикального отклонения. После 100 мс разряда наблюдается движение шнура вниз, которое не фиксируется магнитными датчиками.

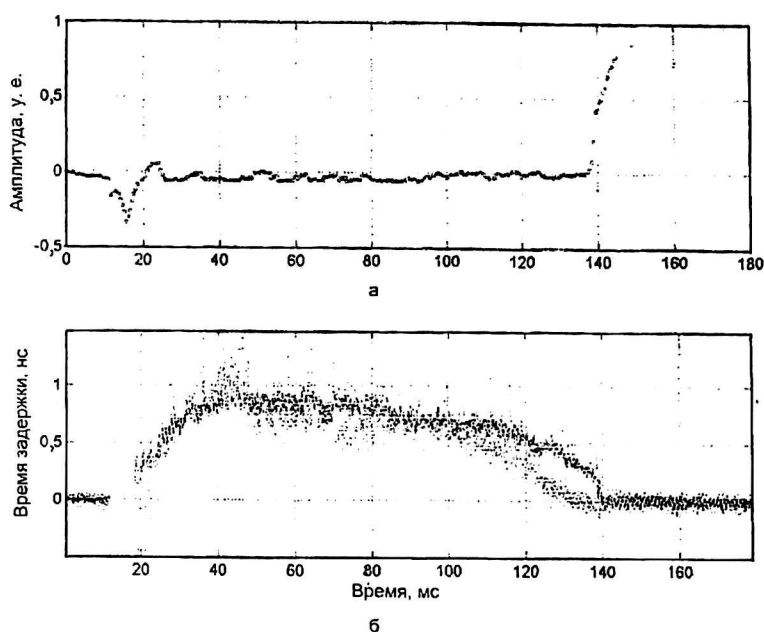


Рис. 6. Сигналы с магнитного датчика вертикального отклонения (а) и с двух каналов ИВР (б)

Смещение шнура, полученное из данных ИВР, в принципе можно использовать в качестве входных сигналов для системы управления положением плазменного шнура по вертикали.

### Выводы

1. Экспериментально апробирован на установке Т-11М метод ИВР плазмы. Метод обеспечивает однозначные измерения средней электронной плотности в плазме. Данная методика весьма привлекательна для крупных токамаков, особенно при работе с длинным импульсом (Tore-Supra, ITER и т. п.).

2. Достигнута точность измерения средней плотности  $\sim 2\%$  при временном разрешении  $\sim 2\text{--}3$  мс. Есть резерв для дальнейшего повышения точности измерений в  $3\text{--}10$  раз путем увеличения частоты повторения зондирующих импульсов от  $100$  кГц до  $1\text{--}10$  МГц.

3. Простота организации доступа к плазме и однозначность измерений позволяют рекомендовать данную методику для измерений вертикального смещения плазменного шнура в системе поддержания вертикального равновесия шнура.

4. Развитие методики:

- разработка и применение ИВР для измерений плотности на токамаке Т-11М в режиме номинальной плотности (несущая частота  $\sim 140$  ГГц);
- разработка и изготовление на основе ИВР датчика вертикального положения плазменного шнура на токамаке Т-11М для системы поддержания вертикального равновесия шнура;

• применение методики для измерений смещения плазменного шнура по горизонтали при вертикальном зондировании плазмы.

5. Отработка методики для применения на ITER (зондирование необыкновенной волной в области частот  $\sim 100$  ГГц).

### Л и т е р а т у р а

1. Шевченко В. Ф., Петров А. А., Петров В. Г., Чаплыгин Ю. А. Времяпролетные методы зондирования плазмы токамака микроволновыми сигналами//Физика плазмы. 1996. Т. 22. № 1. С. 25.
2. Heijnen S. H., et al.: Proc. 22nd EPS Conf. on contr. Fusion and plasma phys. Bournemouth. 3rd-7th July, 1995. P. IV-441.
3. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1960.

## Application of pulse time-of-flight refractometry for plasma mean density measurement in the T-11M tokamak

A. A. Petrov, V. G. Petrov

TRINITI State Scientific Center of the Russian Federation, Troitsk, Moscow region, Russia

*The new method for measuring mean plasma density in magnetic confinement fusion devices — a method of pulse time-of-flight refractometry of plasma — has been realized. The method is based on measuring the propagation time of a short microwave pulses passed through plasma. For an o-mode wave with a carrier frequency much higher than plasma frequency, the delay time of a pulse in a plasma is proportional to the mean electron density and does not depend on the density profile. The main problem in such measurements is low accuracy of delay time measurements, and it was solved during development of pulse time-of-flight refractometer (TFR) in the T-11M tokamak. The experimental results obtained are described.*