

УДК 533.9.082.5

А.В.Сидоров (5 курс, каф. ФП), М.Ю.Кантор, к.ф.-м.н., с.н.с. ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПО СПЕКТРУ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА ФТ-2

Продольное электрическое поле в плазме токамака определяют по напряжению на обходе, однако во многих случаях (динамические процессы, НГ генерация тока и т.д.) данная диагностика не может напрямую давать достоверную информацию о локальном значении электрического поля в плазме. Требуется модельный пересчет, который подразумевает множество предположений.

В данной работе описывается новый локальный метод измерения продольного электрического поля в плазме по искажению спектра тормозного излучения в ближней надтепловой области, принципиальная возможность реализации которого, была показана в работе [1].

В основе метода лежит измерение искажения спектра тормозного излучения, вызванного наличием продольного электрического поля, в ближней надтепловой области. В данной энергетической области функция распределения электронов мало отличается от Максвелловской, и ее форма определяется в основном самим полем и столкновениями и описывается кинетическим уравнением. Для этой области энергий известно решение, дающее линейную по полю поправку к функции распределения, однако при усреднении по углам эта поправка не дает вклад в спектр тормозного излучения плазмы в нерелятивистском приближении. Для определения искажения спектров излучения в работе [2] были найдены поправки второго порядка, из которых вычислены спектры тормозного излучения при наличии электрического поля. Область применимости найденных поправок $2 < W_\gamma/T_e < 1/\sqrt{\varepsilon}$, где $\varepsilon = E/E_c$ $E_c = 4\pi n_e e^3 \Lambda/T_e$ – поле Драйзера.

Отклонение спектра зависит от ε и проявляется в области, где величина $\frac{W_\gamma}{T_e} \sqrt{\varepsilon} \cong \frac{W_\gamma [\text{кэВ}]}{2} \sqrt{\frac{E [B/м]}{n_{e19} T_e [\text{кэВ}]}}$ принимает значения порядка единицы. При более высоких энергиях спектр в основном определяют убегающие электроны, и отклонение спектра растет гораздо быстрее, чем в области применимости поправок. Электроны высоких энергий больше тепловых отклоняются от магнитных поверхностей и имеют меньшую частоту столкновений. Поэтому спектр, определяемый убегающими электронами, задается также и далекими областями плазмы, и эволюцией разряда, что в случае нестационарной неоднородной плазмы не позволяет корректно интерпретировать спектр, без дополнительных предположений. Таким образом, в ближней надтепловой области определяя энергию $W_b \approx T_e/\sqrt{\varepsilon}$, которая является отчетливой границей между тепловой областью и областью убегающих электронов спектра тормозного излучения, можно найти значение продольного электрического поля. $E [B/м] \cong 4n_{e19} T_e [\text{кэВ}] / W_b^2 [\text{кэВ}]$

Для снятия спектров тормозного излучения на токамаке ФТ-2 ($R=55$ см, $a=8$ см) установлен рентгеновский спектрометр. В качестве детектора используется газовый пропорциональный счетчик, наполненный смесью аргона (90%) с метаном (10%) под атмосферным давлением. Входное окно счетчика закрывается бериллиевой фольгой толщиной 50 мкм. Поток излучения из плазмы коллимируется с помощью двух диафрагм, постоянного диаметра 5 мм и переменного (диафрагма непосредственно перед детектором). Угол сбора излучения составлял $\sim 0.13 \cdot 10^{-6}$ стер при диафрагме диаметром 0.5 мм.

На счетчик подается высокое напряжение ~ 1.5 кВ, которое контролируется с помощью делителя. С помощью двух операционных усилителей происходит преобразование токового сигнала в напряжение и последующие усиление до нескольких вольт ($K=0.15$ В/мкА) в полосе от 0.1 до 10 МГц. Усиленный сигнал поступает на 12-ти разрядный АЦП и записывается с тактовой частотой 40 МГц. Объем памяти АЦП позволяет записывать трек длиной 1048575 измерений в течение 26.2 мс плазменного разряда.

Для калибровки детектора использовался радиоактивный источник Fe55 с линией излучения 5.9 кэВ. Полученная в результате калибровки инструментальная функция аппроксимировалась распределением Пуассона, которое использовалось при дальнейшей обработке сигнала. В результате калибровки при напряжении 1500 В получена спектральная ширина 0.4 кэВ (6.81%).

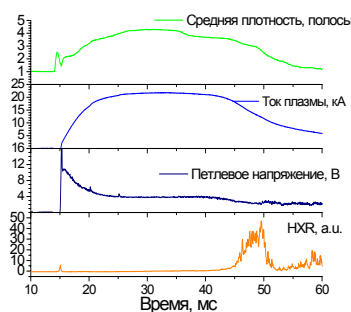


Рис. 1.

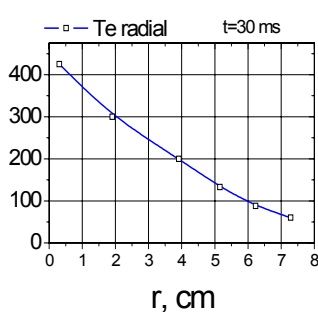


Рис. 2.

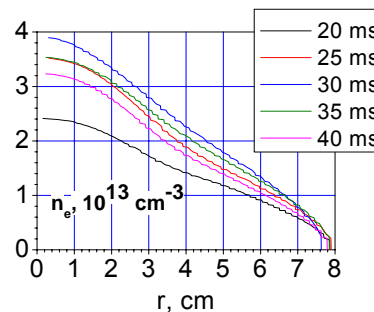


Рис. 3.

Спектры тормозного излучения снимались во время разряда токамака с параметрами плазмы, представленными на рис. 1–3. Измерения спектров проводились между 20 и 46.2 мс при напряжении на счетчике 1500В. Частота счета составляла $\sim 10^5$ квантов в секунду.

На рис. 4 представлены экспериментальные спектры, полученные для различных разрядов токамака, усредненные за 4.5 мс. Измерения проводились при диафрагме диаметром 0.5 мм из центра плазменного шнура. Зеленым цветом нанесены расчетные спектры омической плазмы, вычисленные с помощью данных о температуре и плотности плазмы. При высоких скоростях счета эффективное напряжение на детекторе падает, вследствие чего падает коэффициент усиления [3]. По этой причине из калибровки определялась ширина спектрального разрешения детектора, а сама калибровка проводилась совмещением экспериментального максимума спектра, с максимумом расчетного, при измеренной T_e . Также на рис. 4 нанесена энергия W_b , вычисленная исходя из значения электрического поля полученного по напряжению на обходе. Наблюдается хорошее совпадение расчетной энергии с экспериментальными точками отрыва спектров.

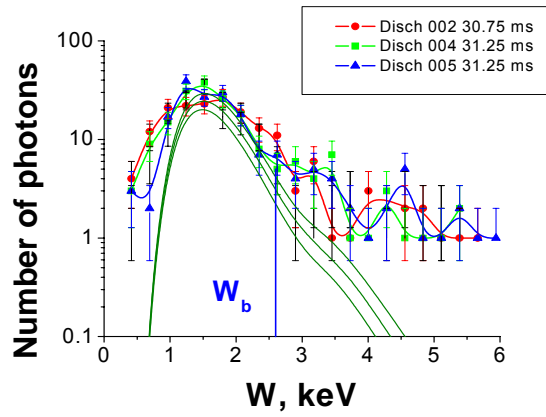


Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kantor M.Yu., Altukhov A.B., Belik V.P., Esipov L.A., Kouprienko D.V., Shmaenok L.A., Yermolayev V.B. 30th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys., Saint-Petersburg, 2003, P-2.60.
2. Kantor M.Yu. Rev. Scient. Instrum., 71, 1162 (2001).
3. Geller J.D., Herrington C. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 107, 503–508 (2002).

