

УДК 533.951

А.В. Сурков (5 курс, каф. ФП), Е.З. Гусаков, д. ф.-м. н., проф.

МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЙАНИЕ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ВОЛНЫ ВБЛИЗИ ВЕРХНЕГО ГИБРИДНОГО РЕЗОНАНСА

В настоящее время большое внимание привлекает изучение флуктуаций плотности плазмы. Подходящим инструментом для таких исследований является диагностика на основе усиленного рассеяния микроволн, разработанная в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Этот метод основан на рассеянии необыкновенной электромагнитной волны на флуктуациях плотности плазмы вблизи верхнего гибридного резонанса (ВГР). Необыкновенная волна распространяется поперек магнитного поля и не имеет компоненты электрического поля вдоль магнитного поля плазмы. Такие волны в определенном диапазоне частот имеют резонанс в плазме, по мере приближения к которому коэффициент преломления волны растет, а длина волны уменьшается. Групповая скорость волны в этой области уменьшается, что сопровождается ростом амплитуды поля волны, обеспечивая сохранение вектора Пойтинга. Этот амплитудный рост вызывает усиление сигнала, рассеянного на флуктуациях в плазме.

При исследованиях этим методом в плазму излучается необыкновенная волна вдоль направления неоднородности плотности и регистрируется сигнал, рассеянный назад флуктуациями плотности плазмы. Анализируется его частотный спектр, а различные модификации этой диагностики позволяют получать и спектр волновых чисел флуктуации, причем малая длина волны зондирующего сигнала, позволяет исследовать мелкомасштабные флуктуации плотности плазмы, а усиление рассеяния дает возможность изучать флуктуации малых амплитуд, недоступные для других методов.

Частотный сдвиг рассеянного назад сигнала соответствует частоте флуктуации, вызвавшей рассеяние назад только в том случае, если волна не подвергалась воздействию турбулентности плазмы. Если волна испытала многократное малоугловое рассеяние, то получить какую-либо информацию из зарегистрированного рассеянного назад сигнала затруднительно. Между тем, длинноволновых флуктуаций, вызывающих малоугловое рассеяние, в плазме существенно больше, чем коротковолновых, вызывающих рассеяние назад, и длинноволновые флуктуации оказывают влияние на результаты экспериментов.

Поэтому для правильной трактовки экспериментальных данных необходимо знать, насколько существенно малоугловое рассеяние при распространении зондирующей волны с заданной диаграммой направленности в присутствии флуктуаций заданного спектра частот и волновых векторов. Для этой цели следует оценить потерю энергии зондирующего пучка электромагнитных волн при распространении в направлении ВГР. Задача осложняется необходимостью рассматривать распространение зондирующей волны в неперпендикулярном магнитному полю направлении, так как есть заданная диаграмма направленности и реально излучается далеко не плоский фронт.

Задача решалась в ВКБ приближении. Были получены выражения для компонент электрического поля необыкновенной волны при ее распространении в неоднородной плазме под малым углом к магнитному полю, и изучено рассеяние такой волны на одной гармонике флуктуаций, т.е. найдено выражение для поля рассеянной волны и вычислен вектор Пойтинга, уносимый рассеянной волной.

Далее изучались три характерных случая. В первом исследовалось рассеяние необыкновенной волны, имеющей плоский фронт и распространяющейся вдоль направления неоднородности плотности плазмы, на флуктуациях заданного спектра волновых векторов. Была получена зависимость рассеянной мощности от проекции k_x волнового вектора зондирующей волны на направление неоднородности, растущей при

приближении к ВГР, а также от параметра спектральной плотности флуктуаций. Первая зависимость оказалась весьма сильной: $P_s \sim k_x^4$. В случае $\delta n/n=0.01$ была произведена следующая оценка: по достижении каких волновых векторов, т. е. насколько близко к ВГР, рассеется вся мощность зондирующей волны. Оказалось, что при параметрах токамака ФТ-1 это произойдет при $k_x \sim 4k_0$, где $k_0=\omega/c$ - модуль волнового вектора зондирующей волны в вакууме.

Также было получено, что основной вклад в рассеяние дают флуктуации малых волновых чисел, т. е. длинноволновые. Таким образом, в реальной ситуации не слишком узкой диаграммы направленности использованная модель является неприменимой. Это потребовало рассмотрения второго случая - зондирующей волны с практически плоским фронтом, но распространяющейся под конечным углом к направлению неоднородности. Полученная в этом случае зависимость от $k_x(x)$ была аналогичной, но, в свою очередь, показала, что в случае реальной диаграммы направленности основной вклад в рассеянную мощность дадут самые большие по амплитуде гармоники зондирующей волны, распространяющиеся под малым углом к направлению неоднородности и вдоль него.

Результаты, полученные с использованием этих двух моделей, позволили проанализировать третий, более сложный, случай реальной диаграммы направленности антенны. Полученное выражение не противоречит результатам двух предыдущих моделей и учитывает зависимость от нового параметра задачи - ширины диаграммы направленности антенны.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что малоугловое рассеяние сказывается весьма существенно. С помощью полученных результатов можно будет дать новую интерпретацию сильного уширения спектра рассеянного назад сигнала, который наблюдается в экспериментах по усиленному рассеянию.

Необходимо отметить, что ВКБ приближение, использовавшееся на этом этапе работы, применимо до $k_x = 2k_0\sqrt{c/v_{Te}}$, где v_{Te} - тепловая скорость электронов, так как далее волна попадает в область, где необходимо учитывать линейную трансформацию зондирующей волны в бернштейновскую моду. После трансформации волна также испытывает малоугловые рассеяния, может рассеяться назад и дать вклад в регистрируемый сигнал. Поэтому важно продолжить исследование и в этой области, хотя это существенно сложнее, чем в области применимости ВКБ.

В результате настоящей работы был проведен анализ малоуглового рассеяния необыкновенной волны с учетом диаграммы направленности антенны на флуктуациях плотности плазмы при распространении в направлении верхнего гибридного резонанса. Вычислена мощность рассеянного сигнала в зависимости от расстояния до ВГР, параметров спектра волновых чисел флуктуаций плотности, ширины диаграммы направленности антенны и параметров плазмы. Полученные оценки говорят о сильном влиянии малоуглового рассеяния на экспериментальные результаты диагностики усиленного рассеяния, и определяют уширение частотного спектра сигнала, регистрируемого этим методом.