

НАУЧНЫЙ СОВЕТ АН СССР
"ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ"

НАУЧНЫЙ СОВЕТ АН БССР
"ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ"

АКАДЕМИЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ КОМПЛЕКС
"ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА
ИМЕНИ А.В. ЛЫКОВА АН БССР"

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА АН БССР

ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

ЧАСТЬ III

МАТЕРИАЛЫ
VIII ВСЕСОЮЗНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Под общей редакцией акад. АН БССР
О. Г. МАРТЫНЕНКО



Минск 1991

А.А. Кабанцев, С.Ю. Таскаев

НЕРАВНОВЕСНАЯ СТРУЯ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ С $T_1 \gg T_e$

Низкотемпературная плазма, получаемая с помощью газоразрядных источников, характеризуется, как правило, относительно еще более низкой температурой ионов $T_1 < T_e$, если основным источником нагрева является выделение джоулева тепла при протекании тока большой мощности. Однако используемый нами импульсный дуговой газоразрядный источник плазмы с холодным катодом генерирует плазменную струю с ярко выраженной аномалией: $T_1 \approx 50$ эВ $\gg T_e \approx 10$ эВ. Причем эта неравновесность сохраняется вниз по течению плазменной струи несмотря на то, что релаксационное время выравнивания температур (≈ 10 нс) много меньше пролетного времени жизни ионов в струе (≈ 100 нс). Непротиворечивое объяснение этой аномалии можно найти только на основе предположения о наличии в плазменной струе некоторого механизма нагрева ионов вследствие диссипации энергии, связанной с тем или иным видом движения плазмы (ударные волны, сильные колебания вследствие неустойчивости и т.п.), когда большая часть тепла в силу большей вязкости выделяется в ионном газе. При этом электронный компонент плазменной струи оказывается своеобразным термостатом вследствие своей высокой теплопроводности вдоль силовых линий ведущего магнитного поля и практически неограниченной эмитирующей способности катода источника плазмы.

Такой механизм был нами экспериментально обнаружен. Термодинамически неравновесная природа плазменных струй служит источником развития в них различных плазменных неустойчивостей. В частности, как было показано в [1], в нашем случае в плазменной струе развивается такая специфическая неустойчивость, как неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (НКГ), связанная, в конечном итоге, с конкретной топологией электродов источника плазмы. Развитие НКГ приводит к возбуждению в плазменной струе "электростатических" волн, распространяющихся поперек магнитного поля с фазовой скоростью u . На плоскости (v_x, v_y) невозмущенные траектории движения ионов имеют вид окружностей. В поле волны, движущейся с фазовой скоростью u ,

траектория иона всегда дважды пересекает (резонансное взаимодействие) фронт волны, если только его скорость $v > u$. При некоторых условиях это взаимодействие приводит к хаотизации фазы вращения иона, броуновскому его движению в пространстве скоростей и, в конечном итоге, к стохастическому нагреву.

Все используемые нами диагностические методики дают хорошо согласующиеся с данной моделью результаты. В штатном режиме работы источника плазмы, характеризующемся развитием в струе НКГ, $T_1^{\perp}$ и $T_1^{\parallel}$ основного компонента близки и составляют 40–60 эВ. При этом анализаторы атомов перезарядки обнаруживают еще и поток атомов с $T_1^{\perp} \sim T_e$, что объясняется наличием в этом потоке значительной доли атомов, образующихся на периферии плазменной струи, где вследствие низкой плотности плазмы время выравнивания $T_1^{\perp}$ и $T_1^{\parallel}$ велико. О накачке энергией именно поперечных степеней свободы говорит и наличие значительной анизотропии $T_1^{\perp} \gg T_1^{\parallel}$ на фронте нарастания плотности плазмы, когда поток атомов перезарядки концентрируется преимущественно в поперечном направлении.

Конструкция используемого нами источника плазмы с кольцевой геометрией разрядного канала позволяет эффективно подавлять развитие НКГ обращением радиального электрического поля плазменной струи. Такое подавление также приводит к падению температуры ионов до значений $T_1 \sim T_e$. Не наблюдается развитие НКГ и в случае штатного распределения потенциала, но в "короткой" плазменной струе, когда она "выбрасывается" на стенки вакуумной камеры непосредственно вблизи выхода из источника. В этом режиме также $T_1 \sim T_e$.

Температура основной массы электронов, связанной по ведущему магнитному полю с катодом источника плазмы, при развитии НКГ увеличивается за счет потока энергии от горячего ионного компонента на 1–2 эВ, что согласуется с соответствующими оценками. Однако в диффузионных "крыльях" плазменной струи наблюдается более значительный прирост T_e в силу магнитной термоизоляции этих "крыльев" от основного ядра струи.

Литература

1. Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. Низкочастотная дрейфовая неустойчивость плазменной струи желобкового типа // Физика плазмы. – 1990. – Т.16, Вып.6. – С.700–709.