

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЛИНЕЙЧАТОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА

В.А. Веретенников, А.Е. Гурей, А.Н. Долгов, В.В. Корнеев, О.Г. Семенов

Обнаружена поляризация линейчатого рентгеновского излучения многозарядных ионов плазмы микропинча в низкоиндуктивной вакуумной искре. Оценки параметров надтепловой электронной компоненты свидетельствуют о том, что она может играть значительную роль в динамике микропинчевания. Эффект поляризации может исказить результаты измерения параметров плазмы спектроскопическими методами.

Образование локальной области (микропинча), отличающейся чрезвычайно малыми размерами (~ 10 мкм) /1/ и временем существования (1 нс) /2/, высокими значениями электронной плотности ($> 10^{21}$ см $^{-3}$) /3/ и температуры (~ 1 кэВ) /4/, в плазме разрядов типа зет-пинч связывают с локальным пинчеванием плазмы разряда до микронных размеров в результате так называемого радиационного сжатия /5/. Данная модель не учитывает кинетические процессы, в соответствии с ней спектр рентгеновского излучения должен иметь тепловой характер. Результаты экспериментальных исследований показывают, что динамика микропинча и параметры плазмы в основном согласуются с моделью радиационного сжатия /1, 2/, однако наблюдения всплеск жесткого рентгеновского излучения /2, 4, 6/ свидетельствуют о наличии в плазме микропинчевого разряда (МПР) высокоэнергичных электронов.

Непосредственное доказательство существования потоков ускоренных электронов в МПР получено в работах /7, 8/, где осуществлен вывод пучка электронов через отверстие в аноде.

Авторы /9/ провели исследование поляризации тормозного излучения МПР в диапазоне энергий квантов > 10 кэВ. Полученные результаты свидетельствуют, по мнению авторов, о присутствии в плазме разряда, распространяющегося вдоль оси системы потока электронов с энергиями от 10 до 30 кэВ.

Присутствие в плазме МПР быстрых надтепловых электронов может оказывать значительное влияние на спектр линейчатого рентгеновского излучения. Расчеты возбуждения линий ионов высокой кратности ионизации в плазме при наличии потока высокоэнергичных электронов /10, 11/ показали, что вследствие различной вероятности возбуждения М-компонент проекции вектора орбитального момента иона на направление распространения электронного потока линейчатое излучение поляризовано, причем направление и степень поляризации различны для разных переходов.

Для целей диагностики наиболее подходящими, как демонстрируют расчеты /10/, являются отличающиеся высокой степенью поляризации в присутствии надтепловых электронов линии гелиоподобного иона железа: резонансная, соответствующая переходу $1s2p\ ^1P_1 - 1s^2\ ^1S_0$, и интеркомбинационная, соответствующая переходу $1s2p\ ^3P_1 - 1s^2\ ^1S_0$. Вектор поляризации резонансной линии совпадает с направлением распространения электронного пучка, в то время как направление поляризации интеркомбинационной линии зависит от энергии возбуждающих электронов. Степень поляризации этих линий различна и зависит от параметров электронного пучка различным образом.

Эксперименты по изучению поляризации линейчатого рентгеновского излучения гелиоподобного иона железа в плазме МПР выполнены на установке типа низкоиндуктивной вакуумной искры, аналогичной /2/. Анализ спектра осуществлялся в направлении, перпендикулярном оси разряда, с помощью брэгговских кристаллов, различающихся периодом решетки и ориентацией относительно оси разряда /10, 11/. Перераспределение относительной интенсивности линий в регистрируемых спектрах при разных углах скольжения θ или при изменении угла φ между осью разряда (направлением разрядного тока) и плоскостью падения рентгеновского излучения на кристалл (рис. 1) свидетельствует о поляризации исследуемого излучения. Можно заключить, что в плазме микропинча на стадии существования ионов гелиоподобного железа присутствует поток надтепловых электронов с энергиями $7 \div 30$ кэВ, плотность которого составляет порядка процента от электронной плотности плазмы излучающей области, и, что весьма существенно, плоскость по-

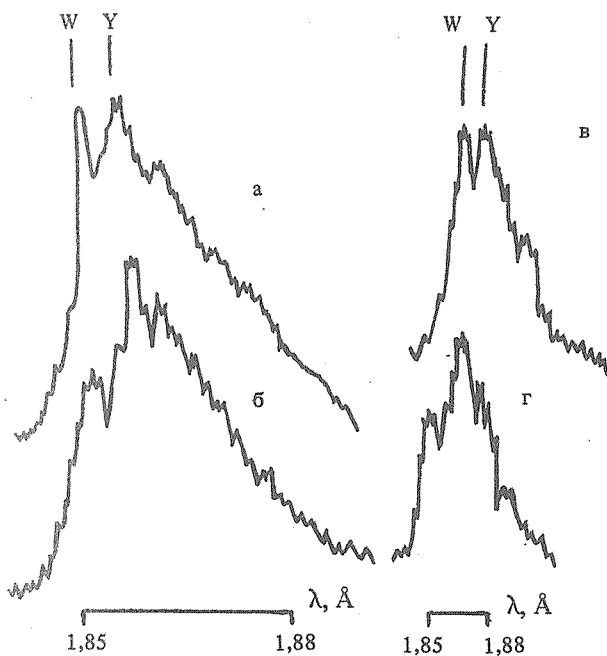


Рис. 1. Денситограммы спектров рентгеновского излучения плазмы железа в микропинчевом разряде (W – резонансная, Y – интеркомбинационная линия гелиоподобного иона) при различных значениях углов φ и θ : $\varphi=0^\circ$, $\theta=28^\circ$ (а); $\varphi=90^\circ$, $\theta=28^\circ$ (б); $\varphi=90^\circ$, $\theta=13^\circ$ (в); $\varphi=90^\circ$, $\theta=52^\circ$ (г).

ляризации регистрируемого излучения соответствует преимущественному направлению движения потока поперек оси разряда. Этот результат, по-видимому, связан с тем, что в микропинче электроны с энергиями 7 – 30 кэВ замагничены и движутся преимущественно по винтовым траекториям вдоль силовых линий магнитного поля, т.е. поперек оси разряда. Смещение этих электронов вдоль оси носит характер дрейфа со скоростью, много меньшей скорости электронов, т.е. цилиндрическая координата φ оказывается выделенной.

Оценки показывают, что надтепловая компонента электронов не может обеспечить заметный нагрев плазмы микропинча, однако может играть роль в динамике радиационного сжатия, так как энергия, уносимая высокоэнергичными электронами в результате дрейфа, сравнима с энергией вытекания плазмы из микропинча.

С методической точки зрения, обнаружение поляризации линейчатого излучения заставляет критически переосмыслить методику измерения температуры и плотности плазмы разряда по относительной интенсивности спектральных линий. Во всяком случае, при проведении соответствующих измерений этот эффект необходимо учитывать или принимать меры для минимизации его влияния на результаты измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веретенников В. А. и др. Физика плазмы, 11, вып. 8, 1007 (1985).
2. Веретенников В. А. и др. Препринт ФИАН № 59, М., 1983.
3. Кононов Э. Я., Кошелев К. Н., Сидельников Ю. В. Физика плазмы, 3, вып. 3, 663 (1977).
4. Кононов Э. Я., Кошелев К. Н., Сидельников Ю. В. Физика плазмы, 11, вып. 8, 927 (1985).
5. Вихрев В. В., Иванов В. В., Кошелев К. Н. Физика плазмы, 8, вып. 6, 1211 (1982).
6. Negus C. R., Peacock N. J. J. Phys. D: Appl. Phys., 12, 91 (1979).
7. Cilliers W. A., Datla R. U., Griem H. R. Phys. Rev., 12A, № 4, 1408 (1975).
8. Jones L. A., Kania D. R. Phys. Rev. Letters, 55, № 19, 1993 (1985).
9. Beier R., Bachmann C., Burhenn R. J. Phys. D: Appl. Phys., 14, 643 (1981).
10. Krutov V. V. et al. Preprint FIAN № 133, М., 1981.
11. Shlyaptseva A. S., Urnov A. M., Vinogradov A. V. Preprint FIAN № 193, М., 1981.

Поступила в редакцию 26 октября 1987 г.