

*Письма в ЖЭТФ, том 17, вып. 8, стр. 409 – 413*

*20 апреля 1973 г.*

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН  
И СРЫВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ  
В РАДИАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОМ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ**

*E. A. Корнилов, С. М. Криковоручко, С. С. Моисеев*

Проведен анализ влияния трансформации высокочастотных волн на режим работы плазменно-пучкового разряда.

Экспериментально показано, что путем изменения радиального распределения плотности плазмы можно обеспечить эффективное излучение колебаний вблизи верхнегибридного резонанса и тем самым предотвратить перекачку их энергии в низкочастотные колебания. Последнее приводит к срыву низкочастотных неустойчивостей в плазменно-пучковом разряде.

Обычно при экспериментальном исследовании процесса линейной трансформации в неоднородной плазме основное внимание уделяется либо нагреву плазмы при трансформации поперечных волн в продольные, либо излучению энергии из системы в обратном случае [1 – 3]. Вместе с тем трансформация волн может оказывать значительно более разнообразное воздействие на систему и, в частности, влиять на ее устойчивость (на возможность использования трансформации волн для повышения устойчивости системы впервые обращалось внимание в [4]). Влияние трансформации волн на устойчивость системы удобно проследить на качественном примере, когда имеются две "моды" колебаний

$K_1$  и  $K_2$ , локализованные в одной и той же области, причем общая область локализации обеих мод отделена барьерами непрозрачности от области прозрачности одной из мод, связанной с вакуумом (тогда часть энергии может просвечиваться из системы в вакуум). Пусть в неравновесной системе может возбуждаться мода  $K_2$ . В однородной среде моды  $K_1$  и  $K_2$  не связаны друг с другом и потому мода  $K_1$ , не влияет на развитие неустойчивости. В неоднородной среде могут существовать точки, где волновые вектора обеих мод совпадают (области "пересечения" мод) и при этом трансформация одной моды в другую в области "пересечения" часто близка к 100% [4]. В среде при этом может возбуждаться только "суперпозиционная мода"  $K_1 + K_2$ , хотя вдали от области "пересечения" удобно попрежнему "слагаемые" новой моды называть соответственно  $K_1$  и  $K_2$  (см., например, [1, 4]). Пусть расстояние между точками "пересечения" мод  $L'$ , а размер области неустойчивости  $L$ ' меньше  $L$ . В этом случае условие неустойчивости при возбуждении "суперпозиционной" моды можно записать в виде:

$$a \exp\left(\frac{y'_2 L'}{V_{g2}} - \frac{y_2 L}{V_{g2}} - \frac{y_1 L}{V_{g1}}\right) > 1 \quad (1)$$

здесь  $y'_2$  — инкремент нарастания моды  $K_2$  в области  $L'$ ,  $y_2$ ,  $y_1$ ,  $V_{g2}$ ,  $V_{g1}$  — соответственно декременты и групповые скорости мод  $K_2$  и  $K_1$ ;  $a^{-1}$  — характеризует во сколько раз уменьшается амплитуда возбуждаемой волны за счет вытекания энергии наружу ( $a < 1$ ;  $y_2, y_1, y'_2 < \omega$ ).<sup>1</sup>

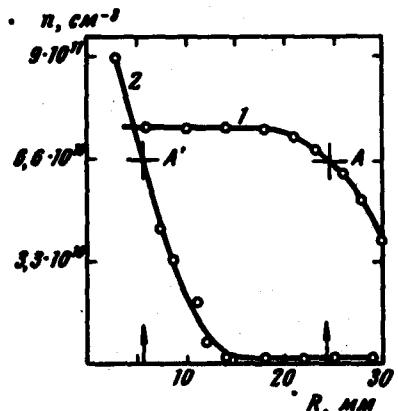


Рис. 1. Распределение плотности плазмы по радиусу колбы; 1 — потенциал на электроде 0 в, 2 — потенциал на электроде — 40 в, A, A' — точки пространства, где  $\omega^2 = \omega_p^2 + \omega_n^2$

Сказанное здесь характерно, например, для интересующего нас случая — взаимодействия электронного пучка с высокочастотными колебаниями радиальнонеоднородной плазмы ( $K_1$  — мода типа моды Бернштейна, распространяющаяся под углом к магнитному полю  $H_0$ ,  $K_2$  — "холодная" мода с особенностью показателя преломления, дисперсионные характеристики которых хорошо известны [5]). Если  $\omega_p^2 < \omega^2 < \omega_p^2 + \omega_n^2$  то обе моды колебаний существуют в центре неоднородного слоя и пучок может возбуждать только "зацепленную" пару (холодную моду и моду Бернштейна). В согласии со сказанным выше можно выделить три режима работы плазменно-пучкового разряда в зависимости от характеристики влияния "пересечения" волновых решений: а) ламинарный режим, ког-

да выполняется условие, обратное (1); б) режим нагрева и НЧ неустойчивостей, когда справедливо (1) и область  $L$  достаточно велика; при этом за счет эффективного взаимодействия одной из составляющих суперпозиционной моды (т. е.  $K_1$ ) с плазмой энергия частично идет на нагрев плазмы, а частично перекачивается в НЧ колебания, что приводит к аномальным потерям частиц и тепла поперек магнитного поля [6, 7]; в) излучательный режим, когда при выполнении (1),  $L$  и барьер непрозрачности малы; в этом случае энергия не "задерживается" в системе и должны срываться низкочастотные неустойчивости.

Экспериментальная проверка данного положения была проведена на установке, описанной в [8]. Работа выполнялась на электронном пучке с энергией 3 – 5 кэв, током до 100 а, в магнитном поле до 2000 гс. В процессе эксперимента регистрировался уровень излучения колебаний, частотный спектр, потери энергии пучком. Излучение принималось вне плазмы с помощью рупорных антенн типа "петля", ориентированных на магнитную составляющую поля. Потери энергии электронами пучка измерялись калориметрическим методом.

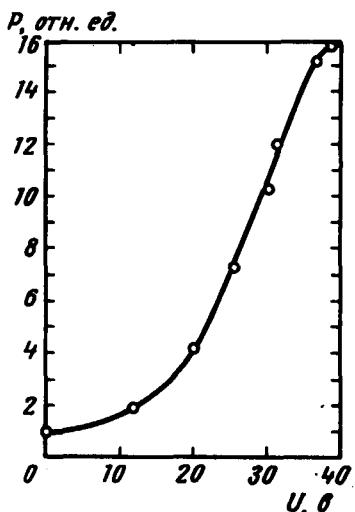


Рис. 2. Уровень излучения мощности колебаний в зависимости от потенциала на электроде

Радиальное распределение плотности плазмы изменялось с помощью подачи отрицательного потенциала на цилиндрический электрод размещаемый коаксиально электронному пучку в начальной области взаимодействия, аналогично тому как это делалось нами в работах [6, 7], где исследовалось влияние внешних потенциалов на неустойчивость плазменно-пучковой системы. Измерение плотности плазмы, пространственное ее распределение производилось с помощью подвижных двойных зондов Ленгмюра.

На рис. 1 представлено изменение радиального распределения плотности плазмы при наложении на электрод потенциала – 40 в. Точки A и A' отмечены пространственные положения точек  $\omega^2 = \omega_p^2 + \omega_h^2$ . На рис. 2 показаны уровни излучения из плазмы при изменении радиального распределения плотности плазмы в некотором направлении. Сопоставление рисунков 1 и 2 показывает, что при уменьшении  $L$  (расстояния от центра пучка до точки, где  $\omega^2 = \omega_p^2 + \omega_h^2$ ) интенсивность излучения возрастает в 16 раз.

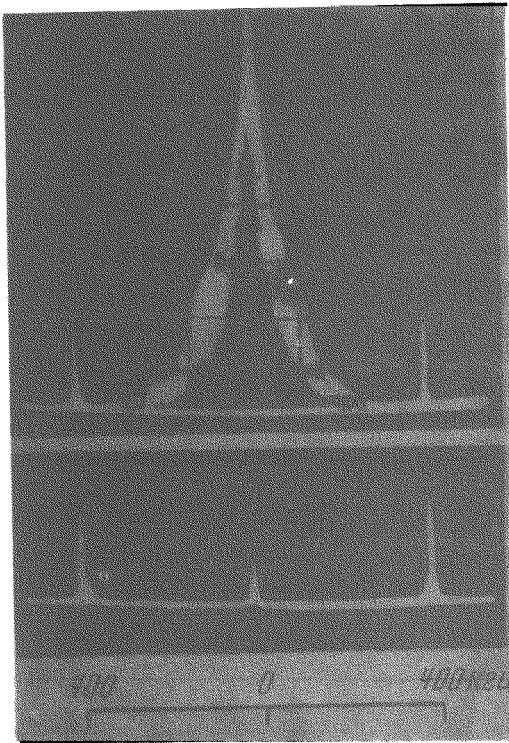


Рис 3. Спектры колебания:  
а – при потенциале на электроде 0 в, б – при потенциале 40 в

При наличии излучения, потери энергии электронами пучка возрастают, а низкочастотные колебания (дрейфовые и дрейфово-диссипативные) пропадают (рис. 3). Причем в этом случае пропадают и ускоренные ионы. Изменение радиального распределения плотности плазмы приводит к переходу от режима б) к режиму в) и стабилизации низкочастотных неустойчивостей. Наши исследования показывают, что те же результаты по срыву НЧ неустойчивости можно получить и при задании градиентов плотности, аналогичных рис. 1, подбором давления в области взаимодействия или градиентами магнитного поля.

В заключение выражаем благодарность Я.Б.Файнбергу за ценные советы, А.С.Бакаю за обсуждение результатов.

Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию

9 января 1973 г.

Физико-технический институт

После переработки

28 февраля 1973 г.

Физико-технический институт

#### Литература

- [ 1 ] В.Е.Голант, А.Д.Пилия. УФН, 104, 413, 1971.
- [ 2 ] А.К.Березин, Г.М.Березина, Н.С.Ерохин, С.С.Моисеев, Я.Б.Файнберг. Письма в ЖЭТФ, 14, 13, 1971.
- [ 3 ] И.Е.Сахаров, В.И.Федоров. ЖТФ, 41, 1536, 1971.
- [ 4 ] С.С.Моисеев. Proc. of the International Conf. on Phen. in Ionised Gases v. II, p.645, Beograd, 1965; Труды международного симпозиума по проблеме многих тел и физике плазмы, М., изд. Наука , 1967, стр., 183.

- [ 5 ] I.Jancarik. at all. In *Plasma Phys. and Cont. Fusion Research* (Proc. Conf. Novosibirsk, 1968); IAEA, 1969, Vienna, p. 733.
  - [ 6 ] С.М.Криворучко, А.С.Бакай, Е.А.Корнилов. Письма в ЖЭТФ, 13, 369, 1973.
  - [ 7 ] А.С.Бакай и др. Труды IV международной конференции по физике плазмы и УТР. Висконсин, США, 1972 г. Доклад CN-28/E-9.
  - [ 8 ] Е.А.Корнилов, Я.Б.Файнберг, Л.И.Болотин, О.Ф.Ковпик. Письма в ЖЭТФ, 3, 354, 1966.
-