

## ВОЗБУЖДЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРАМИ ПУЧКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

23

*С.М.Криворучко, Е.А.Корнилов*

Данная работа посвящена изучению механизма возбуждения низкочастотных (НЧ) колебаний при пучковой неустойчивости, а также возможности управления их спектром путем использования высокочастотной (ВЧ) модуляции электронного пучка на нескольких частотах. Опираясь на полученные нами результаты [1-3], можно было заранее ожидать, что использование ВЧ модуляции электронного пучка на двух частотах из интервала ВЧ спектра позволит возбудить узкий участок НЧ в результате нелинейного взаимодействия двух извне навязанных колебаний [4]. Таким путем можно детально изучить не только отдельные участки НЧ спектра и их взаимодействие, но и идентифицировать колебания, ответить на вопрос о механизме возбуждения колебаний и возможности их использования для нагрева ионов плазмы.

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в работе [1]. Электронный пучок (ток  $50 + 100$  ма, энергия  $5$  кэв) создавал плазму плотностью  $10^{10} + 5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> в постоянном однородном магнитном поле  $1 + 2$  кэс. Модуляция электронного пучка осуществлялась с помощью резонатора на моде  $TM_{010}$ . Резонатор запитывался двумя генераторами десятисантиметрового диапазона через ферритовые развязки.

Регистрация колебаний осуществлялась с помощью анализаторов ИВ-46 и С4-8. Колебания принимались подвижными лентгмюровскими зондами, магнитными диполями. НЧ колебания также регистрировались на коллекторе в токе пучка.

Эксперименты по двухчастотной модуляции электронного пучка проводились в условиях, когда один из монохроматических сигналов небольшого уровня мощности подавался в модулирующую систему на частоте, соответствующей условиям подавления НЧ и ВЧ спектра [1]. После подачи второго монохроматического сигнала в области НЧ спектра появляется сигнал на разностной частоте. В пределах точности измерений частота разностного НЧ колебания всегда равна разности частот двух высокочастотных монохроматов. Путем непрерывного изменения частоты одного из модулирующих монохроматов можно плавно пройти весь НЧ спектр возбуждаемым НЧ монохроматом. Следует особо подчеркнуть, что амплитудное распределение разностного монохромата всегда повторяет форму амплитудного распределения возбуждаемого НЧ спектра.

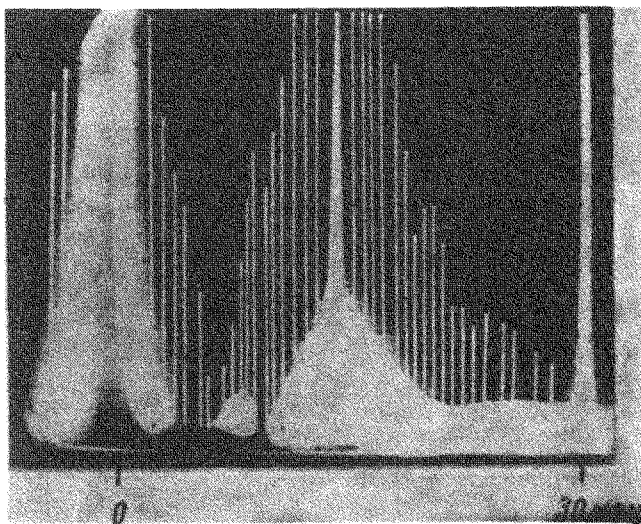


Рис. 1. Восстановление НЧ спектра разностным монохроматом

На рис. 1 представлена одна из оциллограмм, снятых с экрана анализатора С4-8. Сплошные белые широкие полосы изображают часть НЧ спектра, который возбуждается в пучково-плазменном разряде в отсутствие модуляции пучка. Тонкие белые линии соответствуют амплитуд-

ному распределению разностного монохромата при плавном его перемещении по спектру. Эта осциллограмма указывает на то, что разностный монохромат имеет ту же природу возникновения, что и соответствующий ему участок НЧ спектра.

Изучение волновых характеристик разностного монохромата и изменение зависимости частот возбуждаемых колебаний от массы газа, длины взаимодействия, величины магнитного поля показывают, что спектр низких частот можно разбить на три области: 1) область ионно-звуковых волн ( $K_z \gg K_1$ ); 2) область дрейфовых волн, связанных с неоднородностью плотности плазмы ( $K_1 \gg K_z$ ); 3) область волн, связанных с неравновесностью плазмы ( $K_z \gg K_1$ ) [5].

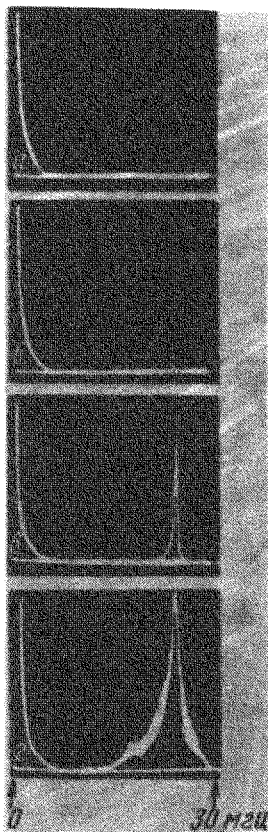


Рис. 2. Зависимость ширины спектра от амплитуды разностного монохромата: *a* – пучок промодулирован на частоте 3010 мГц; *b*, *c*, *d* – пучок промодулирован на частотах 3010 и 3034 мГц

Таким образом НЧ колебания являются прямым следствием пучковой неустойчивости. Они возникают либо в результате нелинейных взаимодействий ВЧ колебаний, либо в результате неоднородности и неравновесности плазмы порождаемых ВЧ полями.

Увеличение амплитуды разностного монохромата в области ионно-звуковых волн путем увеличения амплитуды одного из ВЧ монохромат

приводит к вырождению узкой линии в широкий спектр. Плавным изменением разности частот и амплитуд ВЧ монохромат можно задать необходимую спектральную плотность энергии в любом участке НЧ спектра. Таким образом, путем внешней ВЧ модуляции пучка на двух частотах можно в широком смысле управлять спектром не только ВЧ, но и НЧ колебаний. На рис. 2 представлена зависимость ширины спектра от амплитуды разностного монохромата. Сильное увеличение амплитуды разностного монохромата приводит к развалу широкого спектра на узкие непрерывающиеся области. В этом случае наблюдается обратное влияние НЧ колебаний на высокочастотные колебания, ВЧ колебания возбуждаются в виде временных пакетов. Это, вероятно, соответствует условиям, когда, из-за резкого увеличения амплитуды НЧ колебаний, изменяются дисперсионные свойства плазмы. Причиной развала широкого НЧ спектра на узкие полосы может быть уже нелинейное взаимодействие низкочастотных волн. Для проверки сделанного предположения мы применили трехчастотную высокочастотную модуляцию электронного пучка, что позволяет задать в спектре НЧ колебаний две разностные частоты с плавной перестройкой по НЧ спектру. Путем изменения амплитуд НЧ монохромат можно проследить за их нелинейным взаимодействием.

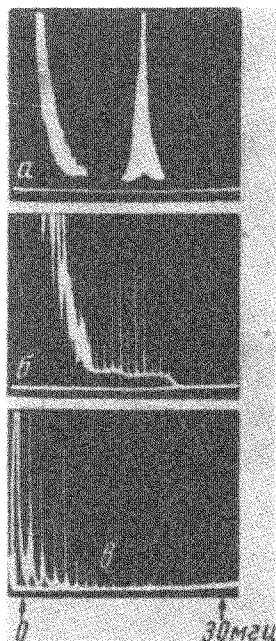


Рис. 3. Нелинейное взаимодействие полосы НЧ колебаний с НЧ монохроматом: *а* — пучок промодулирован на частотах 3010 и 3027 мк $\mu$ ; амплитуда монохромата 3027 мк $\mu$  в 50 раз больше, чем амплитуда монохромата 3010 мк $\mu$ ; *б* — пучок промодулирован на частотах 3008, 3010, 3027 мк $\mu$ ; *в* — амплитуда монохромата 3008 мк $\mu$  в 50 раз больше, чем в случае *б*

Когда амплитуда одного из НЧ монохромат недостаточно велика, в НЧ спектре наблюдается только два монохромата. При повышении амплитуды более низкочастотного монохромата в спектре появляются комби-

национные частоты. Дальнейшее повышение амплитуды может привести к полному поглощению основного монохромата с перекачкой энергии в комбинационные частоты. На рис. 3 показано взаимодействие широкой линии с монохроматом. При повышении амплитуды низкочастотного монохромата *a* широкая линия разбивается на комбинационные частоты *b*. Дальнейшее повышение амплитуды приводит к полному поглощению широкой линии с перекачкой энергии в область спектра, расположенного ниже по частоте.

Таким образом нелинейное взаимодействие НЧ волн позволяет перекачивать энергию в НЧ спектре. Следовательно, внешняя многочастотная модуляция электронного пучка открывает широкие возможности для управления спектром колебаний пучковой неустойчивости.

В экспериментах по многочастотной модуляции пучка наблюдаются высокоэнергетичные ионы, поэтому путем управления шириной спектра НЧ колебаний и спектральной плотностью его энергии можно добиться необходимых условий для эффективного нагрева ионов и тем самым решить вопрос эффективной передачи энергии от электронного пучка электронам и ионам плазмы.

Авторы выражают глубокую благодарность Я.Б.Файнбергу за постоянные обсуждения при постановке и проведении эксперимента, Л.И.Болотину за помощь и интерес к работе.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
15 сентября 1969 г.

### Литература

- [1] Е.А.Корнилов, Я.Б.Файнберг, Л.Б.Болотин, О.Ф.Ковпик. Письма в ЖЭТФ, 3, 354, 1966.
- [2] Б.И.Иванов. Сб. Физика плазмы и проблема управляемого синтеза. Вып. 3, Изд. АН УССР, Киев, 1963, стр. 54; ВЧ свойства плазмы. Изд. АН УССР, Киев, 1965, стр. 179.
- [3] В.И.Муратов. Экспериментальное исследование нелинейного взаимодействия волн в плазме. Диссертация ХГУ 1966.
- [4] С.М.Левицкий, В.З.Шаповал, И.П.Шашурин. ЖТФ, 39, 465, 1969.
- [5] С.С.Моисеев. Письма в ЖЭТФ, 4, 81, 1968.