

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ПЛОТНОСТИ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ И ИЗЛУЧЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН ИЗ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОГО РАЗРЯДА

*А. К. Березин, Г. П. Березина, Н. С. Ерохин,
С. С. Моисеев, Я. Б. Файнберг*

Исследование трансформации продольных колебаний в поперечные в пучково-плазменных разрядах только начинается [1]. В настоящей работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование эффективности процессов трансформации продольных волн в поперечные [2, 3] в зависимости от направления продольного градиента плотности и показано, что знак градиента плотности сильно влияет на интенсивность излучения поперечных волн.

Эксперименты по исследованию взаимодействия электронного пучка с неоднородной плазмой проводились с целью изучения генерации колебаний при различных направлениях градиента плотности. Блок-схема установки приведена на рис. 1 и за исключением плазменной камеры описана в работе [4]. Плазменная камера (область взаимодействия) представляла собой стеклянную трубку длиной 50 см и внутренним диаметром 2,6 см, расположенную в однородном продольном магнитном поле с напряженностью до 2 кэ. Рабочий газ — аргон. Напуск газа мог осуществляться как в начале, так и в конце плазменной камеры, что позволяло получить перепад давлений на концах области взаимодействия $4 - 5 \cdot 10^{-3}$ тор — $8 - 10 \cdot 10^{-5}$ тор. Плазма создавалась электронным пучком с током 5 а, энергией 10 — 12 кэв, длительностью импульса 110 мксек и диаметром 1,2 см. Плотность плазмы измерялась резонаторным методом и составляла на концах исследуемой области

взаимодействия $10^{10} \text{ см}^{-3} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Концентрация ее могла бы монотонно возрастать в направлении инжекции пучка, либо убывать в зависимости от того, с какой стороны осуществлялся напуск рабочего газа.

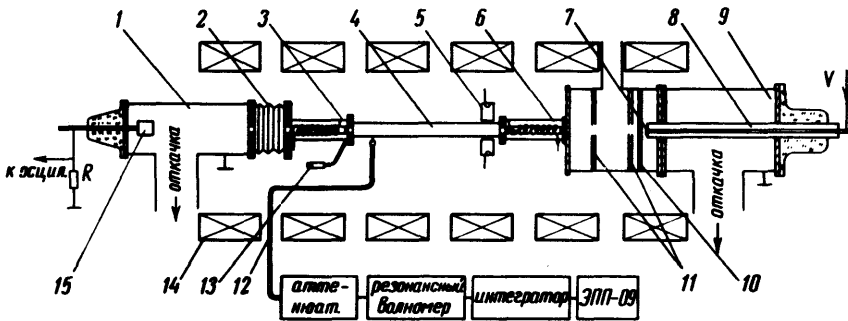


Рис. 1. Блок-схема установки. 1 – экспериментальная камера, 2 – сильфон, 3, 6 – спиральные переходы, 4 – плазменная камера, 5 – резонатор для измерения плотности плазмы, 7 – катод электронной пушки, 8 – электронная пушка, 9 – камера электронной пушки, 10 – анод, 11 – система диафрагм, 12 – внешний зонд, регистрирующий E_r – компоненту поля, 13 – натекатель, 14 – катушки магнитного поля, 15 – цилиндр Фарадея.

Колебания из плазмы принимались внешними зондами, расположенными вне плазменной камеры в продольном направлении и ориентированными на E_r и E_z – компоненты электрического поля, поступали на резонансный волномер, интегратор и на электронный потенциометр ЭПТ-09. Использовался набор резонансных волномеров, перекрывающий диапазон $150 - 7500 \text{ МГц}$.

Помимо зондов производилась регистрация продольной электрической составляющей колебаний, выносимых из плазмы электронным пучком, с помощью широкополосных спиральных переходов, которые располагались в начале и конце плазменной камеры.

Результаты экспериментов показывают, что в случае монотонного нарастания плотности плазмы в направлении инжекции пучка наблюдалась генерация как поперечных, так и продольных колебаний независимо от способа и места их приема (зонды располагались в начале, середине и конце плазменной камеры, спираль – в начале и в конце) во всем исследуемом диапазоне частот.

Частотные спектры колебаний, принятых из плазмы зондом, ориентированным на E_r – составляющую поля в диапазоне резонансного волномера РВД ($600 - 2000 \text{ МГц}$) приведены на рис. 2 (I, II, III). Спектр довольно широк и зависит от положения зонда вдоль направления пучка. Спектр продольных колебаний (рис. 2, IV), снятый со спирального перехода, расположенного в конце плазменной камеры, аналогичен, хотя несколько более разрежен.

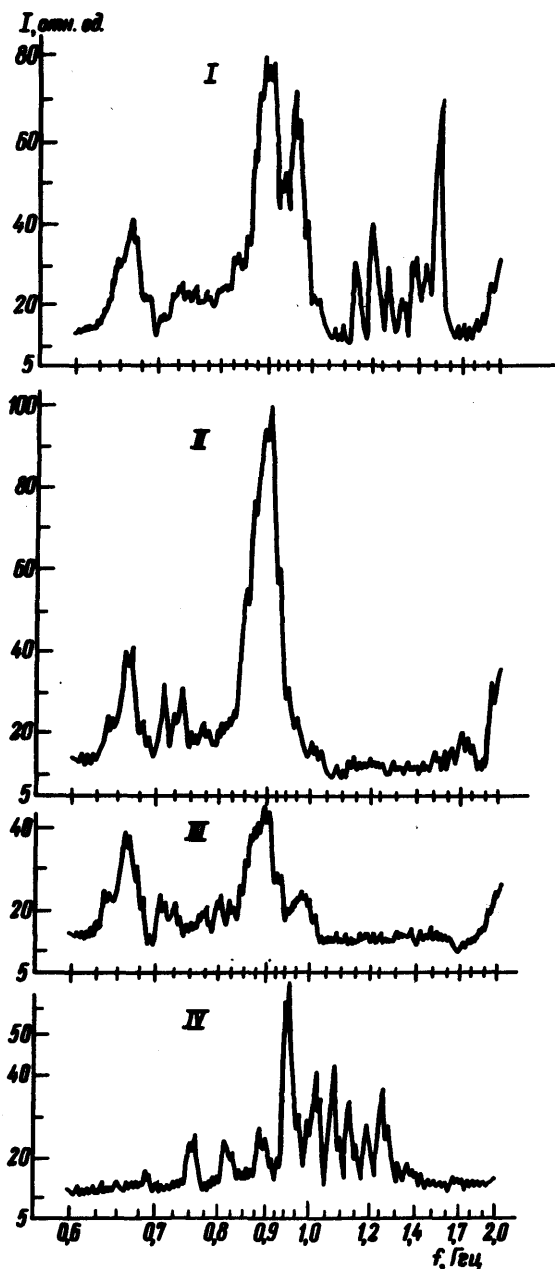


Рис. 2. Спектры колебаний, генерируемых плазменно-пучковым разрядом. I, II, III — спектры в начале, середине и конце плазменной камеры, снятые зондами. IV — спектр продольных колебаний.

Обратный направлению распространения пучка градиент плотности плазмы резко меняет картину излучения колебаний. Наблюдается полное отсутствие генерации поперечных колебаний, регистрируемых зондами, и одновременное наличие излучения продольных компонент. С уменьшением напряженности магнитного поля интенсивность амплитуд частотного спектра падает. Переходя к объяснению экспериментальных результатов, отметим, что за исключением области резонанса ($\omega \sim \omega_p \cdot \cos \theta$ при $\omega_H > \omega_p(z)$) собственные колебания покоящейся холодной плазмы и сносные колебания пучка слабо взаимодейст-

вуют и описываются хорошо известными дисперсионными свойствами (см. [5]; ω , ω_H , ω_p — соответственно частоты: возмущений, электронные — ларморовская и ленгмюровская, меняющаяся вдоль оси области взаимодействия; θ — угол волнового вектора с магнитным полем). Если пучок движется в сторону спада плотности, то усиливающаяся "холодная" плазменная мода распространяется в сторону движения пучка (групповая скорость параллельна фазовой при ω и в окрестности $\omega \sim \omega_p$ трансформируется в быстро затухающую коротковолновую "горячую" плазменную волну [2, 3], для которой невозможны условия распространения в вакууме. Этому и соответствует отсутствие съема энергии поперечных колебаний при таком распространении. Необходимо отметить, что, если плотность плазмы заметно меняется на расстояниях L , сравнимых с длиной волны λ , то следует учитывать трансформацию волн и в областях, где геометрическая оптика в первом приближении по λ/L применима [2]. С учетом указанного замечания ясно, что при движении пучка (а, следовательно, и возмущения) в сторону роста плотности (т. е. когда показатель N^2 уменьшается) заметная доля энергии трансформируется в волны, "вытекающие" из плазменной камеры наружу. Такой переход возможен также и при $N^2 > 1$. Отметим, что при движении пучка в сторону роста плотности квазилинейный режим, обнаруженный в [6], мог бы привести лишь к уменьшению рассматриваемого здесь эффекта, т. к. энергия при этом должна переходить обратно к пучку. В нашем случае из-за сильной неоднородности ($\lambda/L \lesssim 1$) это обстоятельство, по-видимому, несущественно.

Выражаем признательность В.А.Буцу, Л.И.Болотину, Г.А.Жилинскому, В.И.Курилко, В.И.Федорову, И.Ф.Харченко за полезное обсуждение затронутых здесь вопросов.

Поступила в редакцию
14 июня 1971 г.

Литература

- [1] В.О.Александров, В.Е.Голант, А.П.Жилинский. ЖТФ, 41, 66, 1971.
- [2] В.Л.Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., Наука, 1967.
- [3] С.С.Моисеев. Труды VII-й Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Белград, 645, 1967.
- [4] А.К.Березин, Я.Б.Файнберг, Л.И.Болотин, Г.П.Березина, И.А.Безъязычный, Ю.М.Ляпкало, Е.В.Лифшиц. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Vienna, 1, 515, 1966.
- [5] А.Б.Михайловский. Теория плазменных неустойчивостей, 1, Атомиздат, 1970.
- [6] Б.Н.Брейзман, Д.Д.Рютов, ЖЭТФ, 57, 1401, 1969.