

533.9(05)

ДЕМОНСТРАЦИЯ САМОФОКУСИРОВКИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН

Нелинейные эффекты, имеющие место при распространении волн большой амплитуды в различных средах, изучаются в настоящее время в целом ряде вузовских курсов: оптика ^{1, 2}, теория волновых процессов ³, физика плазмы ^{4, 5} и т. д. Однако до сих пор нет лабораторных приборов, которые позволяли бы наглядно демонстрировать эффекты самовоздействия волновых полей.

Например, весьма интересным и важным для многих приложений нелинейным явлением является самофокусировка электромагнитных волн, предсказанная Г. А. Аскарьяном в 1962 г. Эффект самофокусировки обусловлен изменением оптических свойств среды под действием достаточно интенсивного поля волны, создающего в среде нечто вроде линзы. В Горьковском университете им. Н. И. Лобачевского разработан

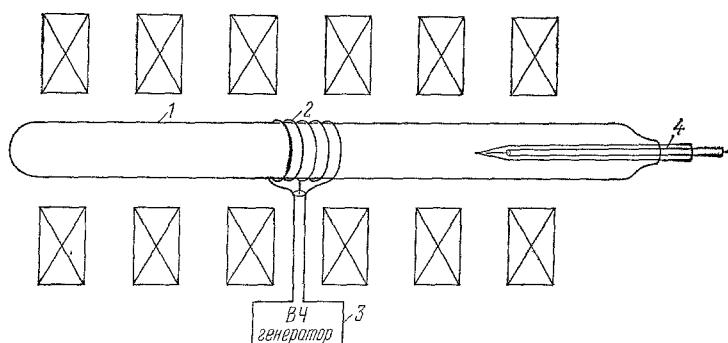


Рис. 1. Схема отпаянного варианта прибора для демонстрации самофокусировки плазменных волн.

простой и надежный в работе прибор, позволяющий демонстрировать эффекты самофокусировки и самоканализации плазменных волн в магнитном поле ⁶⁻⁸. Работа прибора основана на использовании того факта, что при малых уровнях подводимой ВЧ мощности $W < 100$ Вт (степень ионизации мала, $n_e/N_0 \lesssim 10^{-5}$) и малых длинах свободного пробега электронов по сравнению с размерами неоднородности поля структура

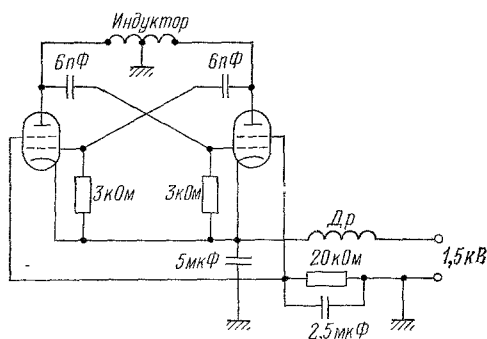


Рис. 2. Электрическая схема ВЧ генератора для возбуждения плазменных волн.

разряда в нижнегибридном диапазоне частот повторяет структуру волновых полей, создающих и поддерживающих разряд. Схема прибора показана на рис. 1.

Кварцевый или стеклянный разрядный баллон (1) диаметром 6—10 см и длиной 100—150 см помещается в продольное магнитное поле $B \sim 500—1000$ Гс, создаваемое соленоидом из нескольких (4—5) отдельных катушек ($\Delta B/B \lesssim 0,1$). Баллон откачан до давления $p \sim 10^{-2}$ Торр и может быть отпаян. Разряд в разреженном воздухе возбуждается с помощью внешнего спирального индуктора (2), который является анодной нагрузкой двухтактного генератора (3), собранного на лампах ГУ-33В (рис. 2). Частота генерации $f = 60$ МГц, подводимая мощность $W \lesssim 100$ Вт. Число витков индуктора 5, его общая длина $l \sim 5—10$ см.

В качестве ВЧ источника можно также использовать промышленные генераторы ГСТ-2 ($f \sim 180$ МГц, $W \sim 25$ Вт). Через мягкое вакуумное уплотнение в торце внутрь баллона вставлена стеклянная трубка ($\varnothing 4$ мм, $L \sim 50$ см), внутри которой можно передвигать коаксиальную штыревую антенну (4) для диагностики ВЧ полей в разряде. Антенна представляет собой отрезок коаксиального кабеля РК-50-1 с выступающим на 1 см концом центральной жилы. В варианте с непрерывной откачкой в качестве вакуумного уплотнителя можно взять резиновую трубку. ВЧ сигнал с выхода антенны подается на один из входов осциллографа С 7-8, на второй вход подается опорный сигнал с

аналогичной антенны, расположенной вблизи индуктора. Сравнение фаз колебаний в разных точках разряда позволяет определить длину волны в плазме.

Общий вид разряда, возбуждаемого и поддерживаемого полем косых лэнгмюровских волн, показан на рис. 3, а. Темные вертикальные полосы на фотографии оставлены тенью от магнитных катушек. Отметим, что диаметр плазменного шнура существенно меньше диаметра разрядного баллона. На рис. 3, б показан в увеличенном масштабе участок разряда вблизи индуктора. На этой фотографии хорошо видна резонансная коническая поверхность, опирающаяся на индуктор, и вытянутый из ее вершины вдоль магнитного поля узкий плазменный шнур. С помощью подвижной штыверной антенны и скоростного осциллографа, синхронизованного сигналом с индуктора, легко убедиться, что вдоль шнура бегут медленные волны, длина которых $\lambda_{||}$ близка к удвоенной длине индуктора ($\lambda_{||} \sim 2l$), а величина замедления $\lambda_0/\lambda_{||} = c/f\lambda_{||} \sim 10^2$. В заданном диапазоне частот ($\omega_{Bi}, \omega_{pi} \ll \omega \ll \omega_{pe}, \omega_{Be}$, где $\omega_{Be,i}$ — гирочастоты электронов

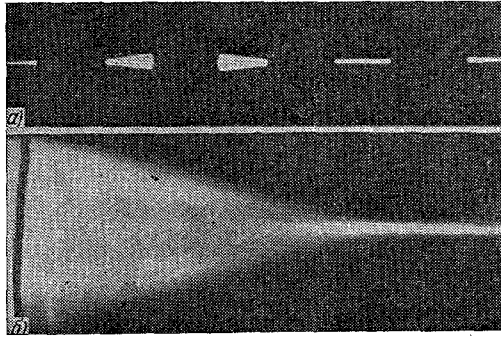


Рис. 3. Структура разряда, возбуждаемого в результате самоканализации косых лэнгмюровских волн.

и ионов, $\omega_{pe,i}$ — плазменные частоты электронов и ионов) такое замедление могут иметь только потенциальные косые лэнгмюровские (нижнегибридные) волны⁹. Напомним, что эти волны распространяются лишь в достаточно плотной плазме с концентрацией электронов n_e выше критической ($n_{кр} = m\omega^2/4\pi e^2$)^{4, 9} и часто называются внутренними плазменными волнами. Соотношение между поперечными ($k_{\perp} = 2\pi/\lambda_{\perp}$) и продольными ($k_{||} = 2\pi/\lambda_{||}$) волновыми числами для этих волн зависит от концентрации электронов $k_{\perp} \approx k_{||} \sqrt{n_e/n_{кр}}$ ($\omega_{pe} \ll \omega_{Be}$) и в условиях опытов определяется величиной подводимой ВЧ мощности. Перемещая штыверную антенну поперек разрядного баллона, можно показать, что амплитуда продольной компоненты электрического поля волны, бегущей вдоль шнура, имеет максимум на оси шнура и монотонно спадает к стенкам баллона. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что демонстрируемая структура разряда обусловлена самоканализацией ионизирующих плазменных волн, которые образуют и поддерживают согласованное распределение плазмы в виде самолокализованного плазменно-волнового канала, вытянутого вдоль магнитного поля из фокуса резонансной поверхности. Наглядным доказательством правильности этого утверждения могут служить следующие факты. С увеличением подводимой ВЧ мощности растет плотность плазмы, что заметно по увеличению яркости оптического излучения из разряда. В результате в соответствии с теорией^{9, 10} угол раскрытия резонансного конуса уменьшается, область фокуса отодвигается от источника и увеличивается длина плазменно-волноводного канала. При больших значениях подводимой ВЧ мощности $W \gtrsim 50$ Вт ($P \lesssim 2 \cdot 10^{-2}$ Торр, $B \gtrsim 600$ Гс) прибор позволяет наблюдать слоистые структуры разряда, которые демонстрируют высшие типы колебаний в самолокализованном плазменном волноводе. Например, при возбуждении второй симметричной моды появляется цилиндрический ореол вокруг центрального плазменного шнура, а возбуждение несимметричных мод приводит к возникновению в соответствующих участках поля боковых плазменных полос. При выключении магнитного поля разряд превращается в диффузионно размытый эллипсоид с центром в области источника, а сигнал с подвижной антенны резко падает.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика.— М.: Наука, 1980.
2. Аскарьян Г. А.— УФН, 1973, т. 111, с. 249.
3. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн.— М.: Наука, 1979.
4. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме.— М.: Наука, 1967.
5. Кадоицев Б. Б. Коллективные явления в плазме.— М.: Наука, 1976.
6. Марков Г. А., Миронов В. А., Сергеев А. М.— Письма ЖЭТФ, 1979, т. 29, с. 672.
7. Марков Г. А., Миронов В. А., Савин В. Г., Сергеев А. М.— Физика плазмы, 1980, т. 6, с. 670.
8. Марков Г. А., Миронов В. А., Сергеев А. М., Соколова И. А.— ЖЭТФ, 1981, т. 80, с. 2264.
9. Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы.— М.: Высшая школа, 1978.
10. Андронов А. А., Чугунов Ю. В.— УФН, 1975, т. 116, с. 79.