

ГЕНЕРАЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В ПЛАЗМЕ ИНТЕНСИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ*Ю.Я.Бродский, А.А.Жаров, С.И.Нечуев, Я.З.Слуцкер*

Экспериментально исследуется эффект возникновения квазистационарного магнитного поля при взаимодействии интенсивной электромагнитной волны с плазмой. Показано, что магнитное поле создается током ускоренных высокочастотным полем электронов.

1. Возникновение квазистатического магнитного поля (КМП) при взаимодействии интенсивного излучения с плазмой впервые было обнаружено в экспериментах по лазерному УТС [1, 2]. Аналогичные эксперименты, проведенные в СВЧ диапазоне, позволили исследовать КМП и его зависимость от мощности излучения [3, 4]. Для объяснения экспериментальных результатов в этих работах привлекаются известные [5] механизмы генерации КМП: увлечение электронов, связанное с передачей импульса электронам от электромагнитной волны при ее поглощении в плазме, а также возбуждение тока из-за непараллельности $\vec{\nabla}n$ и $\vec{\nabla}T_e$.

Наши эксперименты инициированы исследованиями, в которых было обнаружено появление интенсивных неизотропных потоков ускоренных электронов с преимущественным направлением ускорения вдоль электрического поля падающей волны [6, 7]. Геометрия тока в плазме была такова, что возбуждаемое им магнитное поле должно было иметь конфигурацию, соответствующую распределению поля, снятому в работе [4].

2. Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в работе [6]. Напомним кратко ее основные характеристики: плазменный слой диаметром 50 см и толщиной 30 см создавался внутри вакуумной камеры, в которой поддерживалось давление $3 \cdot 10^{-4}$ тор. Концентрация плазмы в центре слоя могла достигать значения $n = 1,5n_c$ (n_c – критическая концентрация). Температура электронов в плазме T_e равнялась 10 эВ, ионов – 0,5 эВ. Электромагнитная волна десятисантиметрового диапазона излучалась из открытого конца волновода размером $(1,5 \times 1,5) \lambda_0$ (λ_0 – длина СВЧ волны в вакууме) расположенного на оси плазменного слоя в двадцати сантиметрах от его центра. Длительность импульса излучения составляла $\tau_i = 10$ мксек. Мощность излучения регулировалась и позволила проводить исследования при значениях парамет-

ра $\eta = E_0^2 / 8\pi n T_e$ (E_0 — поле в отсутствии плазмы) лежащих в диапазоне от 10^{-3} до $7,5 \cdot 10^{-1}$. КМП измерялось при помощи 180-витковой экранированной катушки диаметром 2 см. Исследование потоков ускоренных электронов производилось коллимированным электростатическим анализатором. Ток в плазме измерялся с помощью пояса Роговского.

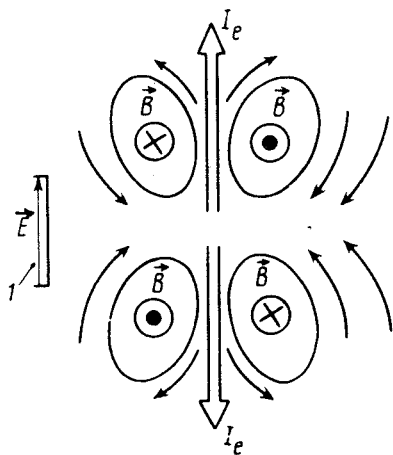


Рис. 1. Конфигурация генерируемого магнитного поля и токов в плазме (1 — излучатель)

3. Измерения показали, что возникающее магнитное поле имело окупольную структуру, аналогичную полученной в работах [3, 4]. Схематически геометрия поля приведена на рис. 1. На рис. 2, а представлена зависимость величины магнитного поля от параметра η . Как видно из графика на кривой можно легко выделить три характерных участка. При достаточно малых значениях η , $\eta < \eta_c \approx 10^{-2}$ зависимость $B(\eta) \sim \eta^{1/2}$. Далее при $\eta_c < \eta < \eta_H$ $B(\eta)$ становится пропорциональной η и затем при $\eta > \eta_H$ наступает насыщение. Было обнаружено также, что в диапазоне η , соответствующем линейной зависимости магнитного поля $B(\eta)$ наблюдается перемещение положения максимума поля в область более высоких концентраций плазмы (рис. 2, б).

Одновременно с исследованием генерации КМП проводились измерения тока электронов ускоренных вдоль направления поля падающей волны. Зависимость величины этого тока от параметра η приведена на рис. 2, а. Совместный анализ обеих кривых показал существование несомненной связи между потоком электронов и КМП, генерируемым при мощностях излучения, которым соответствует значение параметра $\eta > \eta_c$. На это указывают следующие факты. Во-первых, порог появления ускоренных электронов¹⁾ совпадает с первым изломом в зависимости $B(\eta)$ при $\eta = \eta_c$. Во-вторых, зависимость тока ускоренных электронов при $\eta_c < \eta < \eta_H$ имеет так же как и $B(\eta)$ линейный характер. В-третьих, при $\eta > \eta_H$ ток ускоренных электронов так же как и КМП выходит на насыщение. И, наконец, в-четвертых, имеется отчетливая временная корреляция между величиной тока ускоренных электронов и напряженностью КМП (рис. 3).

¹⁾ В экспериментах регистрировались электроны с энергиями $W_e \approx 30$ эВ.

Измеренные значения тока позволяют сделать приближенную оценку величины индуцируемого КМП. При $\eta = 2,8 \cdot 10^{-1}$ ток, измеренный поясом Роговского (диаметром $D = 5$ см), составлял $I_e = 2,8 a$. По величине этого тока нетрудно оценить генерируемое КМП $B \sim 4I_e / cD = 0,22$ Гс, что удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением $B = 0,35$ Гс.

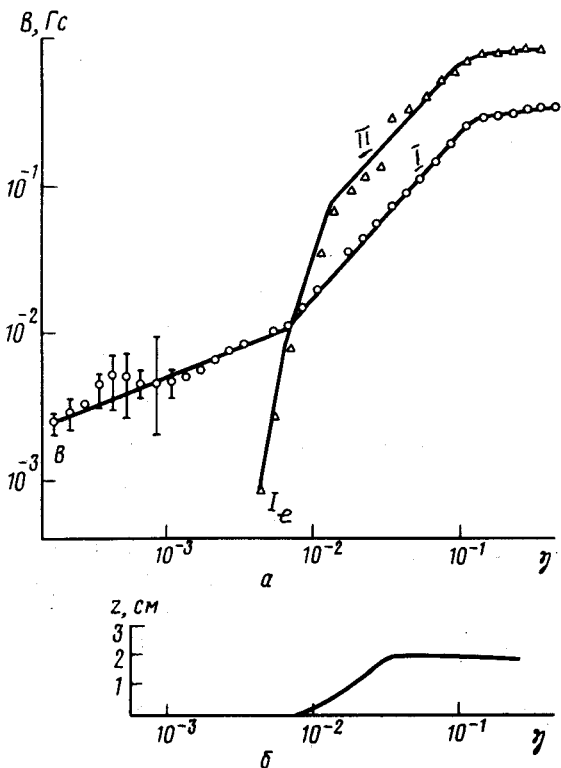


Рис. 1

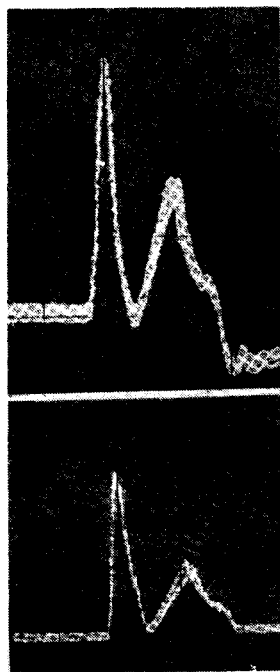


Рис. 2

Рис. 2. а — I — зависимость магнитного поля от η , II — зависимость тока ускоренных электронов от η (нормировано на I_e^{max}); б — зависимость координаты положения максимума магнитного поля от η

Рис. 3. Осциллограммы магнитного поля и тока с электростатического анализатора в течение одного и того же импульса электромагнитного излучения

4. Возникновение тока быстрых электронов можно объяснить следующим образом. В области критического слоя $n = n_c$ при превышении порога модуляционной неустойчивости $\eta > \nu/\omega$ возникает мелко-масштабное расслоение плазмы вдоль электрического ВЧ поля и ускорение электронов возникающей структурой.

Следует отметить, что магнитное поле существует также и до возникновения тока быстрых электронов. Механизм его генерации на низких уровнях мощности можно объяснить возникновением тока увлече-

ния $\mathbf{j}_{e \text{ увл.}} = e \langle n \mathbf{V} \rangle$ (механизм термоэдс) $\nabla n \times \nabla T_e$ в данном случае не может иметь существенного значения в силу малости времени перераспределения температуры).

В заключение, отметим, что эффект генерации КМП в лазерной плазме также может быть связан с током ускоренных электронов, возникающих при параметрической неустойчивости. Для грубой оценки величины КМП предположим, что в поле s -поляризованной волны электроны ускоряются в направлении электрического поля волны в слое толщиной $d \approx 3l(k_0 l)^{-2/3}$, (d — ширина первого максимума функции Эйри, l — характерный масштаб неоднородности плазмы). Если концентрация ускоренных электронов составляет несколько процентов от невозмущенной концентрации $n_\Gamma = (0,01 - 0,03)n_0$ (для неодимового лазера $n_0 = 10^{21} \text{ см}^{-3}$, а их энергия $W_\Gamma = 10 \text{ кэВ}$, то оценивая величину КМП по формуле $B = 2\pi e n_\Gamma v_\Gamma / c \cdot d$, получаем значения, согласующиеся с наблюдаемыми в экспериментах магнитными полями $B \sim 10^6 \text{ Гс}$.

Авторы благодарны И.Г.Кондратьеву, А.Г.Литваку и М.А.Миллеру за обсуждения и Е.И.Раковой за помощь в обработке экспериментальных результатов.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
20 декабря 1980 г.

Литература

- [1] J.A.Stampek, K.Popadopoulos, R.N.Sudan, S.O.Dean, T.A.McLean, B.H.Ripin. Phys. Rev. Lett., 26, 1012, 1971.
- [2] J.A.Stamper, E.A.McLean, B.H.Ripin. Phys. Rev. Lett., 40, 1177, 1978.
- [3] W.F.Divergillio, A.Y.Wong, H.C.Kim, Y.C.Lee. Phys.Rev. Lett., 38, 541, 1977.
- [4] S.P.Obenschain, N.C.Luhmann. Phys. Rev. Lett., 42, 311, 1979.
- [5] T.Speriale, P.J.Catto. Nys. Fluids, 21, 2063, 1978.
- [6] Ю.Я. Бродский, В.Л.Гольцман, А.Г.Литвак, С.И.Нечуев. Кн. Взаимодействие сильных электромагнитных волн с бесстолкновительной плазмой. Горький, ИПФ АН СССР, 1980, стр. 186.
- [7] Ю.Я.Бродский, В.Л.Гольцман, В.А.Миронов, С.И.Нечуев. ЖЭТФ, 78, 1636, 1978.