Письма в ЖЭТФ, том 104, вып. 5, с. 303 – 305

Торсионная альфвеновская и медленная магнитозвуковая волны, создаваемые плазмой в магнитном поле

В. Н. Тищенко[1], *Ю. П. Захаров, И. Ф. Шайхисламов, А. Г. Березуцкий, Э. Л. Бояринцев, А. В. Мелехов, А. Г. Пономаренко, В. Г. Посух, П. А. Прокопов*

Институт лазерной физики СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 28 июня 2016 г.

После переработки 13 июля 2016 г.

Экспериментально выявлен новый эффект: последовательность вспышек двухкомпонентной лазерной плазмы создает в силовой трубке магнитного поля поток, содержащий торсионную альфвеновскую и медленную магнитозвуковую волны.

DOI: 10.7868/S0370274X16170021

Механизм объединения волн (МОВ), последовательно создаваемых оптическими пробоями или иными сгустками плазмы взрывного характера, позволяет формировать инфра-ультразвук в газах [1, 2], а в плазме с магнитным полем низкочастотную торсионную альфвеновскую (АВ) и медленную магнитозвуковую (МВ) [3–6], распространяющиеся вдоль силовой трубки поля. В отличие от известных методов, например [7], волны переносят энергию и импульс (МВ), момент импульса (АВ). АВ и МВ движутся вместе или АВ опережает МВ. МВ – волна сжатия плазмы фона δn, магнитное поле вытеснено на величину B_Z и давление в МВ равно давлению фона. Признаки АВ — вращение плазмы V_φ, продольный ток J_Z, азимутальное магнитное B_φ и радиальное электрическое E_r поля. Ранее поля и токи в лазерной плазме исследовались вблизи мишени [8]. В [9] изучалась изгибная альфвеновкая волна, создаваемая одним оптическим пробоем в плазме с магнитным полем.

Выявлен новый эффект: МОВ применим и для источника, действующего в магнитном поле в вакууме. В камере (5×1.2 м) с аксиальным однородным магнитным полем $B_0 \sim 350$ Гс двухкомпонентная плазма создавалась в результате последовательного облучения полиэтиленовой CH_2 мишени (диск диаметром 2.5 см, толщина 0.5 см), сфокусированном излучением двух независимых CO_2-лазеров. Энергия каждого импульса ~ 190 Дж, пиковая мощность $\sim 8 \cdot 10^8$ Вт, длительность ~ 0.5 мкс мала по сравнению со временем теплового расширения лазерной плазмы. Лучи совмещены на мишени на площади ~ 5 см^2, плотность энергии ~ 40 Дж/см^2 в каждом импульсе, что обеспечивало эффективное формирование сгустков взрывающейся плазмы ~ 25 Дж (в каждом). В зависимости от задержки τ запуска второго лазера создавались два потока или единый поток плазмы, локализованные в силовой трубке магнитного поля, радиус которой равен $R \sim 20$ см. На расстоянии $Z = 91$, 120, 156, 240 см от мишени измерялось распределение по R величин – B_φ, E_r, V_φ и n, nv, B_Z (v – скорость плазмы). B_φ, E_r максимальны при $R = 4$ см, а J_Z, n, nv, B_Z – на оси симметрии $R = 0$. В статье представлены максимальные значения. Использовались электрические и магнитные зонды, коллектор, пояс Роговского для измерения J_Z, ($Z = 106$ см). Скорость вращения плазмы в АВ определялась из соотношения $V_\varphi = -C_A \cdot B_\varphi / B_0$.

Параметры эксперимента выбраны из условия, что сгустки плазмы с разными массами ионов создают АВ так же, как и в плазме с магнитным полем: торсионная АВ формируется при расширении лазерной плазмы в результате взаимодействия через силу Лоренца тяжелой (C^{3+}) и легкой (H^+) компоненты между собой и с магнитным полем. Первый сгусток создает в силовой трубке поток плазмы, содержащий признаки АВ. Второй – формирует АВ и МВ в магнитоплазменной трубке. Отдельные сгустки плазмы создают единую АВ и единую МВ при выполнении критериев МОВ [4, 5]:

$$\omega \approx f \cdot R_d / C_A \approx_P, \quad \alpha = V_0 m_2 Z_1 / C_A m_1 Z_2 > 5,$$
$$R_L = r_L / R_d \approx 0.3 \div 2. \qquad (1)$$

Здесь f – частота повторения сгустков, ω – безразмерная частота, R_d – динамический радиус расширения одиночного сгустка, r_L – ларморовский радиус тяжелых ионов, C_A – скорость АВ в двухкомпонентной плазме, Z_i, m_i, a_i – заряд, масса и доля ионов

[1] e-mail: tvn25@ngs.ru

в смеси. Индексы 1 и 2 – легкие и тяжелые ионы. При $\omega \ll \omega_p \approx 0.3$ силовая трубка заполняется отдельными потоками, которые содержат поля и токи, характерные для АВ (B_φ, J_Z, E_r, V_φ) и МВ (δ_n, B_Z). При $\omega \approx 0.3 \div 0.5$ МОВ формирует единые АВ и МВ. При $\omega \gg \omega_p$ длина волн слабо зависит от количества сгустков. Из (1) находятся радиус потока ($\sim R_d/2$), минимальная концентрация плазмы в нем, начальная энергия и минимальная частота повторения сгустков, при которых действует МОВ:

$$R_d/2 = 10^{-4} \cdot V \cdot m_2/Z_2 \cdot B_0 \cdot R_L,$$

$$n \geq 4.8{\cdot}10^{22}{\cdot}\alpha^2{\cdot}B_0^2(Z_2 m_1)^2/V_0^2{\cdot}(a_1 m_1{+}a_2 m_2){\cdot}(Z_1 m_2)^2,$$

$$Q[\text{Дж}] = 4 \cdot 10^{-21} \cdot V_0^3 \cdot m_0^3 \cdot (1+\beta)/Z_2^3 \cdot B_0 \cdot R_L^3,$$

$$F[\text{Гц}] = 10^4 \omega_p B_0 R_L Z_1/\alpha m_1,$$

где $\beta \sim 0.5$ – отношение давления плазмы в трубке к давлению магнитного поля.

На рис. 1 представлен расчет Q, n и задержки между лазерными импульсами $\tau \sim 10^6/f$ для лазерной плазмы ($H^+ + C^3+$): $H^+ - Z_1 = 1$, $m_1 = 1$, $a_1 = 0.67$; $C^{3+} - Z_2 = 3$, $m_2 = 12$, $a_2 = 0.33$, $V_0 = 10^7$ см/с. Здесь $\alpha = 5$, $\omega = 0.5$, $R_L = 0.3$, $\beta = 0.5$ близки к измеренным. Символами обозначены измеренные Q и $n_* = n[\text{см}^{-3}]/10^{13}$, динамический радиус равен $R_d = (8\pi Q/B_0^2(1+\beta))^{1/3}$. Энергия ($Q \sim 25$ Дж) сгустка принята равной сумме кинетической и тепловой энергий потока плазмы, которые определены из распределения по радиусу nv, n и температуры плазмы (из вольтамперных характеристик зондов). Измерения проведены в сечениях $Z = 91$ и $Z = 156$ см. Максимальный радиус области свечения ~ 18 см, измеренный ЭОП, хорошо согласуется с оценкой $\sim R_d/2$ при $Q \sim 25$ Дж. Величина τ равна максимальной задержке между импульсами, при которой создавалась единая АВ и МВ. Выше кривой τ формируются отдельные потоки, в которых поля и токи такие же, как в АВ и МВ. Измерения проведены при $B_0 > 350$ Гс и $Q \sim 25$ Дж, при которых радиус потока в ~ 3 раза меньше радиуса камеры. Расчетное и измеренное τ совпадают, если Q и n_* удовлетворяю (1).

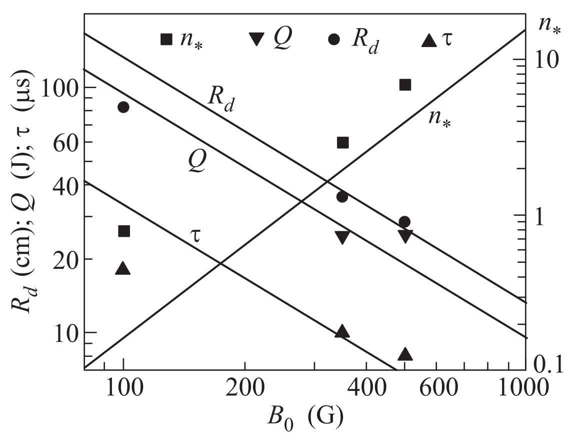

Рис. 1. Зависимость от магнитного поля диаметра потока, энергии плазмы Q, задержки между вспышками плазмы τ и концентрации плазмы. Символы – эксперимент

На рис. 2 показано распространение АВ и МВ, созданных вторым сгустком в потоке плазмы от первого. Одиночный сгусток создает поток плазмы, в котором регистрируются B_φ, J_Z, E_r и n, B_Z. Но это не волна, т.к. фоновой плазмы нет. При облучении мишени двумя импульсами первые максимумы сигналов соответствует первому сгустку, а вторые – это АВ и МВ, созданные вторым сгустком. Волновая природа подтверждается не только наличием признаков АВ (B_φ, J_Z, E_r) и МВ (n, B_Z), но и тем, что вторые максимумы движутся с соответствующей волновой скоростью. Расчетные значения скоростей и измеренных по времени регистрации вторых максимумов $B\varphi$ и B_Z имеют близкие значения, равные $C_A \approx 5 \cdot 10^6$ см/с, скорость МВ $\sim 4.5 \cdot 10^6$ см/с. Скорость движения первого максимума плазменного потока равна $V_P \approx 6 \cdot 10^6$ см/с. Скорость плазмы в точке наблюдения волн равна $\sim (3{-}4) \cdot 10^6$ см/с. Скорость вращения плазмы в АВ – $V_\varphi \approx 3 \cdot 10^5$ см/с. На рис. 2b, d ток J_Z приведен в сечении $Z = 106$ см. В близких сечениях (рис. 2b) B_φ и J_Z имеют сравнимые длительности ~ 30 мкс. Увеличение длительности B_φ, n, B_Z при $Z = 156$ см (рис. 2d) связано с тем, что скорость переднего фронта плазмы превышает скорость распространения АВ и МВ.

При облучении мишени одновременно двумя лазерными импульсами ($\tau = 0$) создавался поток плазмы и поля, амплитуда которых в 1.5 раза больше, а длина примерно такая же, как от одиночного лазерного импульса. При $\tau > 25$ мкс регистрируется два отдельных потока. При $\tau < 10$ мкс сгустки создают единые возмущения (B_φ, J_Z, E_r) и (n, B_Z), что соответствует частоте $\omega > 0.3$, при которой проявляется МОВ. Длина результирующих АВ и МВ в 2 раза больше, чем от одиночного импульса с большой энергией. Значение МОВ – малые затраты энергии при создании протяженного потока, содержащего АВ и МВ. На рис. 2d показаны безразмерные величины, характеризующие состояние потока после двух импульсов. Значения n, α, ω, β, R_L удовлетворяют условиям формирования АВ и МВ третьим сгустком плазмы при его наличии, а также проявлению МОВ.

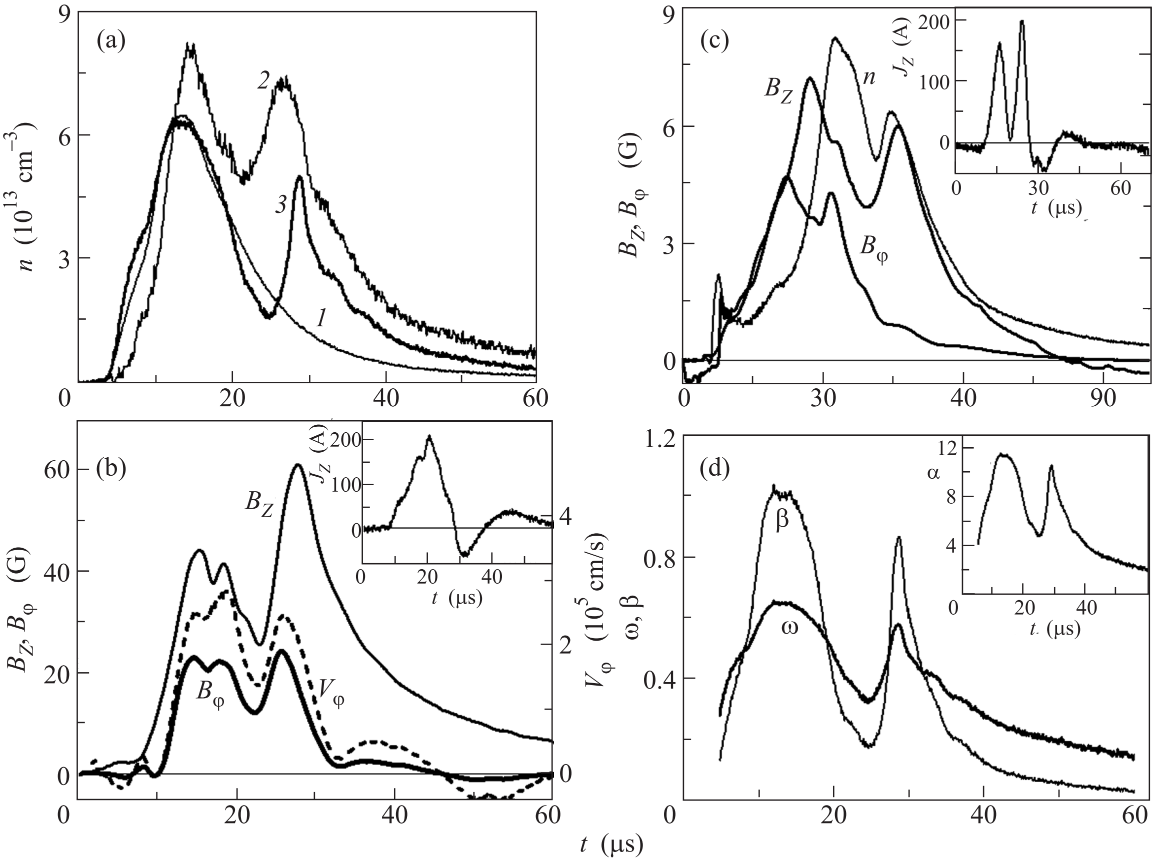

Рис. 2. Изменение во времени n, B_Z, $B\varphi$, J_Z, V_φ (a–c) и критериев МОВ (d), $B_0 = 350$ Гс. Ток J_Z измерен в сечении $Z = 106$ см. (a) – *1* – одиночный сгусток, *2* – $\tau = 5.5$ мкс, *3* – $\tau = 10$ мкс, $Z = 91$ см. (b) – $\tau = 5.5$ мкс, $Z = 91$ см. (c) – $\tau = 10$ мкс, $Z = 156$ см. (d) – $\tau = 10$ мкс, $Z = 91$ см. Время $t = 0$ – облучение мишени первым лазерным импульсом

Таким образом, последовательность сгустков взрывающейся плазмы и МОВ позволяют создавать в силовой трубке магнитного поля протяженный поток вращающейся плазмы, содержащей торсионную альфвеновскую и медленную магнитозвуковую волны.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН “Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности”.

1. В. Н. Тищенко, В. В. Аполлонов, Г. Н. Грачев, А. И. Гулидов, В. И. Запрягаев, Я. Г. Меньшиков, А. Л. Смирнов, А. В. Соболев, Квантовая электроника **34**, 941 (2004).
2. Г. Н. Грачев, А. Г. Пономаренко, В. Н. Тищенко, А. Л. Смирнов, С. И. Трашкеев, П. А. Стаценко, М. И. Зимин, А. А. Мякушина, В. И. Запрягаев, А. И. Гулидов, В. М. Бойко, А. А. Павлов, А. В. Соболев, Квантовая электроника **36**, 470 (2006).
3. В. Н. Тищенко, И. Ф. Шайхисламов, Квантовая электроника **40**, 464 (2010).
4. В. Н. Тищенко, И. Ф. Шайхисламов, Квантовая электроника **44**, 98 (2014).
5. В. Н. Тищенко, И. Ф. Шайхисламов, А. Г. Березуцкий, *Механизм объединения волн в космической плазме с магнитным полем: транспортировка импульса и момента импульса*, альманах *Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности*, МГУ, М. (2014), с. 65.
6. П. А. Прокопов, Ю. П. Захаров, В. Н. Тищенко, Э. Л. Бояринцев, А. В. Мелехов, А. Г. Пономаренко, В. Г. Посух, И. Ф. Шайхисламов, Солнечно-земная физика **2**, 14 (2016).
7. М. Е. Гущин, С. В. Коробков, А. В. Костров, Д. А. Одзерихо, С. Э. Привер, А. В. Стриковский, ПЖЭТФ **92**, 89 (2010).
8. В. В. Аполлонов, Н. В. Бугров, Н. С. Захаров, В. Р. Сороченко, *Генерация электромагнитных полей и токов в лазерной плазме*, ЦФТИ МО РФ (2001), 132 с.
9. C. Niemann, W. Gekelman, C. G. Constantin, E. T. Everson, D. B. Schaeffer, S. E. Clark, D. Winske, A. B. Zylstra, P. Pribyl, S. K. P. Tripathi, D. Larson, S. H. Glenzer, and A. S. Bondarenko, Physics of Plasmas **20**, 012108 (2013).