

## НЕСТАЦИОНАРНОЕ И НЕЛИНЕЙНОЕ ВРМБ В ПЛАЗМЕ

М. В. Чеготов, К. Хенкель\*, Б. Кронаст\*, В.П. Силин

*Приведены экспериментальные данные по исследованию временной эволюции ВРМБ с высоким разрешением. Дана их теоретическая интерпретация.*

В докладе /1/ и в последующей работе /2/ предложена интерпретация экспериментов по ВРМБ излучения  $\text{CO}_2$  лазера в заранее приготовленной плазме на основе существенно нестационарного описания рассеяния. Поскольку мы ограничились областью сравнительно слабого рассеяния, когда нелинейные эффекты не проявляются, то оказалось возможным интерпретировать сравнительно небольшой объем экспериментальных данных. В настоящем сообщении рассмотрена более широкая область значительного отражения излучения благодаря ВРМБ, в которой нелинейные эффекты проявляются. Показано, что экспериментальные данные могут быть интерпретированы на основе двух положений: во-первых, положения о существенной нестационарности ВРМБ, и во-вторых, предположения о единственном механизме нелинейности — истощении накачки.

Описание свойств заранее приготовленной плазмы, в которой происходит ВРМБ, дано в работах /3/ и /2/. В отсутствие излучения  $\text{CO}_2$  лазера плазма существует в течение около 100 нс с неизменной электронной и ионной температурами равными 10 эВ с пространственно однородной на длине 12 мм плотностью электронов  $n_e = 1,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования временной эволюции мощности лазерного излучения накачки  $P_p$ , мощности рассеянного излучения  $P_s$ , энергетического коэффициента рассеяния  $R(t) = P_s(t)/P_p(t)$  ( $P_p = 0,45P_w$  — мощность лазерного излучения в центральном наиболее интенсивном гауссовом пике поперечного распределения лазерного пучка). Временное разрешение составляло 10 пс. В таблице также приведены рассчитанные с помощью описанного в /4/ численного кода температуры электронов  $T_e(t)$  и ионов  $T_i(t)$ .

Истощение накачки, характеризуемое энергетическим коэффициентом отражения  $R = P_s/P_p$ , проявляется в эффективном уменьшении коэффициента  $\kappa$  пространственного ВРМБ усиления в  $(1 - R)^{-1}$  раз. Учитывая этот факт в нестационарном подходе к описанию ВРМБ, предложенном в /1, 2/, можно записать следующую систему уравнений

\* Рурский университет, г. Бохум, ФРГ.

Таблица 1

Эволюция во времени измеряемых на эксперименте величин для опытов  
при длительности лазерного импульса по половине высоты 3 нс при пиковой мощности

$P_{w, \max} = 350 \text{ МВт}$  (верхняя часть таблицы) и  $820 \text{ МВт}$  (нижняя часть)

t, нс	$P_w$ , МВт	$P_i$ , МВт	R, %	$T_c$ , эВ	$T_l$ , эВ
0	61,0	0,26±0,19	0,95±0,69	50,67	17,64
18	63,0	0,37±0,20	1,31±0,71	51,12	17,72
36	65,0	0,49±0,20	1,68±0,68	51,57	17,79
54	66,5	0,71±0,21	2,37±0,70	51,88	17,85
72	68,5	1,13±0,23	3,67±0,75	52,30	17,91
90	70,5	2,25±0,27	7,09±0,85	52,73	18,00
108	72,5	4,92±0,35	15,08±1,07	53,14	18,10
126	74,5	7,59±0,41	22,64±1,22	53,54	18,18
144	76,5	9,98±0,46	28,99±1,34	53,94	18,24
162	79,0	12,82±0,52	36,06±1,46	54,44	18,32
180	81,0	16,01±0,57	43,92±1,56	54,82	18,38
198	83,0	18,77±0,61	50,25±1,63	55,19	18,44
216	85,0	19,79±0,63	51,74±1,65	55,56	18,50
234	87,5	20,45±0,64	51,94±1,63	56,02	18,60
252	90,0	20,63±0,64	50,94±1,58	56,46	18,70
270	92,0	20,78±0,64	50,19±1,55	56,81	18,75
288	94,5	20,83±0,64	48,98±1,51	57,25	18,81
306	97,0	20,56±0,64	47,10±1,47	57,67	18,89
324	99,5	20,29±0,64	45,32±1,43	58,09	18,97
342	102,0	19,69±0,63	42,90±1,37	58,50	19,06
0	55,0	0,09±0,45	0,36±1,82	47,93	15,96
18	57,0	0,15±0,48	0,59±1,87	48,40	16,05
36	59,0	0,17±0,48	0,64±1,81	48,87	16,15
54	61,5	0,35±0,54	1,27±1,95	49,34	16,24
72	63,5	0,50±0,58	1,75±2,03	49,81	16,32
90	66,0	1,03±0,71	3,47±2,39	50,28	16,40
108	68,0	2,09±0,92	6,83±3,00	50,75	16,46
126	71,0	4,40±1,26	13,77±3,94	51,39	16,55
144	73,0	7,94±1,65	24,17±5,02	51,79	16,61
162	76,0	11,18±1,94	32,69±5,67	52,36	16,69
180	78,5	16,58±2,35	46,94±6,65	52,83	16,76
198	81,0	21,07±2,64	57,81±7,24	53,28	16,83
216	84,0	22,69±2,74	60,03±7,25	53,81	16,93
234	87,0	23,97±2,81	61,23±7,18	54,33	17,03
252	90,0	24,38±2,83	60,20±6,99	54,83	17,10
270	93,0	24,79±2,86	59,24±6,83	55,33	17,17
288	96,0	24,92±2,86	57,69±6,62	55,81	17,24
306	99,0	25,57±2,90	57,40±6,51	56,28	17,33
324	102,0	25,61±2,90	55,80±6,32	56,75	17,41

$$R(t) = \epsilon \left( \frac{1}{\gamma_s(s)} \frac{\partial}{\partial s} [\kappa(s)(1 - R(s))] \Big|_{s=t_0(t)} + 1 \right)^{-1/2} [\kappa(t_0(t))(1 - R(t_0(t)))]^{-3/2} \times$$

$$\times \exp \left\{ 2\kappa(t_0(t)) [1 - R(t_0(t))] - 2 \int_{t_0(t)}^t \gamma_s(s) ds \right\},$$

$$\left\{ \kappa(t_0(t)) [1 - R(t_0(t))] \right\}^2 = 2 \int_{t_0(t)}^t \kappa(s)(1 - R(s)) \gamma_s(s) ds, \quad (2)$$

связывающую зависящий от времени энергетический коэффициент ВРМБ отражения и момент запаздывания  $t_0(t)$ . Здесь  $\epsilon$  определяется уровнем тепловых флуктуаций, в условиях данного эксперимента  $\epsilon \approx 10^{-12}$ ,  $\gamma_s$  — декремент затухания ионно-звуковых волн. Для коэффициента пространственного усиления можно использовать выражение /2/:

$$\kappa(t) = 158 P_p(t) \frac{45}{T_e(t)} \frac{\Gamma(3)}{\Gamma(T_e/T_i)} \frac{2}{1 + 3T_i(t)/T_e(t)} \operatorname{arctg} \left( \frac{L_{pl}}{2x_0} \right),$$

где  $P_p(t)$  измеряется в сотнях мегаватт,  $T_e$  и  $T_i$  в электронвольтах,  $L_{pl} = 12$  мм — длина однородной плазмы,  $x_0 = k_0 \rho_0^2 / 2$ ,  $k_0$  — волновое число лазерного излучения,  $\rho_0 = 100$  мкм — радиус гауссова пучка  $\text{CO}_2$  лазера, относительный декремент затухания ионного звука  $\Gamma(T_e/T_i) \equiv \gamma_i / \Delta\omega_0 = 1,1(T_i/T_e)^{1,75} \exp[-(T_i/T_e)^2]$ .

Система уравнений (1), (2) была решена с учетом приведенных в табл. 1 численных значений для  $T_i(t)$ ,  $T_e(t)$  и  $P_p(t)$ . Результаты решения приведены на рис. 1 в виде сплошных кривых для  $R(t)$ , которые отвечают эволюции во времени мощности накачки  $P_w(t)$  (штриховые линии).

Рис. 1а отвечает пиковой мощности  $P_{w,\max} = 350$  МВт, а рис. 1б — 820 МВт. Соответственно этому второй рисунок отвечает более быстрому росту во времени мощности накачки. Теоретические кривые хорошо согласуются с экспериментальными точками. До значений  $R(t) \leq 10\%$  рост во времени коэффициента ВРМБ отражения близок к экспоненциальному. Для значений  $10\% \leq R(t) \leq 50\%$  реализуется зависимость, близкая к линейной, когда  $dR(t)/dt \approx 4,5$  ГГц для рис. 1а и  $dR(t)/dt \approx 6$  ГГц для рис. 1б. Далее рост коэффициента ВРМБ отражения замедляется, что отвечает экспериментальным данным. Последующее расхождение теоретических предсказаний с экспериментальными результатами не находит объяснения в рамках данной простой модели. Отметим, что в области значений  $R(t)$ , для которых экспериментальные данные соответствуют нашей интерпретации, пренебрежение нестационарностью и насыщением приводит к отличию от эксперимента на несколько порядков.

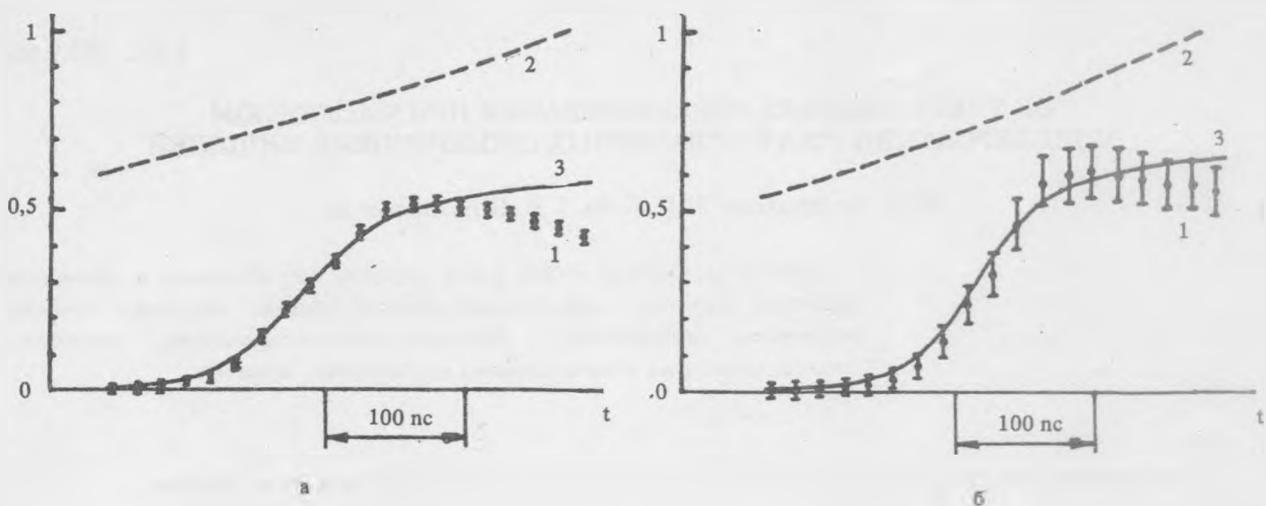


Рис. 1. Эволюция во времени измеряемых в эксперименте коэффициента отражения (1) и полной мощности лазерного излучения (в сотнях мегаватт) (2), а также рассчитанного по формулам (1), (2) уровня рассеяния (3) для двух опытов с  $P_{W, \max} = 350 \text{ МВт}$  (а) и  $820 \text{ МВт}$  (б).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chegotov M. V., Henkel K. Deutsche Physikalische Gesellschaft E. V., ser. Ф, Munchen, 1990.
2. Chegotov M. V. et al. Journ. Moscow Phys. Soc., 1, 253 (1991).
3. Gellert B., Kronast B. Appl. Phys. B, 32, 175 (1983).
4. Gellert B., Handke J. Computer Physics Communications, 30, 169 (1983).

Поступила в редакцию 2 сентября 1991 г.