

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНВЕРСИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БЫСТРЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В ПРОБЛЕМЕ ЛТС

П.П.Волосевич, В.Б.Розанов

СО₂-лазеры длительное время считались наиболее вероятными системами для использования в будущих лазерных термоядерных реакторах, так как КПД их высок (5 – 10%), и существует возможность длительной

работы в режиме с частотой повторения. Однако, исследования последних лет [1 - 3, 5 - 7] показали, что физика взаимодействия излучения CO_2 -лазера с плазмой мишени оказалась крайне неблагоприятной для целей ЛТС. Из-за большой длины волны CO_2 -лазеров и соответственно, низкой критической плотности плазмы, тормозное поглощение лазерного излучения оказывается не эффективным, лазерное излучение поглощается только вследствие резонансного эффекта, который приводит к трансформации поглощенной энергии в быстрые электроны. В результате уменьшается доля поглощенной энергии (по сравнению с Nd-лазерами) и резко ухудшаются гидродинамические показатели мишени, поскольку быстрые электроны нагревая всю мишень, вносят существенную энергию в термоядерное горючее, что препятствует достижению высоких сжатий. По данным [4] при энергии CO_2 -лазера $3 \cdot 10^3$ Дж поглощается около 20% энергии и 90% от этого количества переходит в быстрые электроны с характерной температурой 50 кэВ. Для поглощения этих электронов приходится использовать в мишени толстый слой испаряемого материала (аспектное отношение мишени $R/\Delta R \approx 2$), что приводит, как указывалось, к низким гидродинамическим показателям мишени. По некоторым оценкам достижение одного и того же эффекта по сжатию и нейтронному выходу с помощью CO_2 -лазеров требует в несколько раз больше энергии (почти на порядок), чем при использовании Nd-лазеров.

В связи с вышеизложенным, перспективным для термоядерного реактора считается коротковолновый лазер с длиной волны в диапазоне 0,25 - 0,5 мк. Преимущества такого лазера с точки зрения физики взаимодействия излучения с мишенью заключается в высоком уровне поглощения, связанного с обратным тормозным процессом, отсутствии проникающих излучений (жестких электронов и рентгена) и, самое главное, высоком коэффициенте гидродинамической передачи η (доле от поглощенной лазерной энергии, перешедшей в кинетическую энергию части мишени, движущейся внутрь) [8 - 10].

Цель данной работы заключается в том, чтобы обратить внимание на возможность выбора режима облучения мишеней длинноволновыми лазерами (прежде всего CO_2), когда генерируемые в короне быстрые электроны имеют такую энергию (и, соответственно, пробег до замедления), при которых их энергия выделяется хотя и во внешней части испаряемой оболочки мишени, однако включающей достаточно плотные слои с плотностью выше критической. Размер области энерговыделения следует выбрать оптимальным образом для сжатия и последующего горения мишени. При этом будет также полностью отсутствовать предварительный нагрев термоядерного горючего. В указанных условиях длинноволновый лазер будет действовать подобно коротковолновому, так как быстрые электроны будут переносить энергию в глубокие плотные слои мишени. Существенным эффектом в рассматриваемой схеме является отражение быстрых электронов от внешней вакуумной границы короны. Как и в случае коротковолнового лазера оптимальный режим характеризуется длительностью импульса облучения, равной времени сжатия мишени и умеренными потоками в диапазоне $10^{13} - 10^{14}$ Вт/см².

Безусловно, быстрые электроны не полностью подобны коротковолновому излучению. По-видимому, наиболее важное отличие состоит в том, что электроны передают энергию плазме примерно равномерно по массе [11, 12], в то время как фотоны — пропорционально локальной плотности. Поэтому, в случае электронов корона мишени будет близка к изотермической, что очевидным образом невыгодно для гидродинамической эффективности.

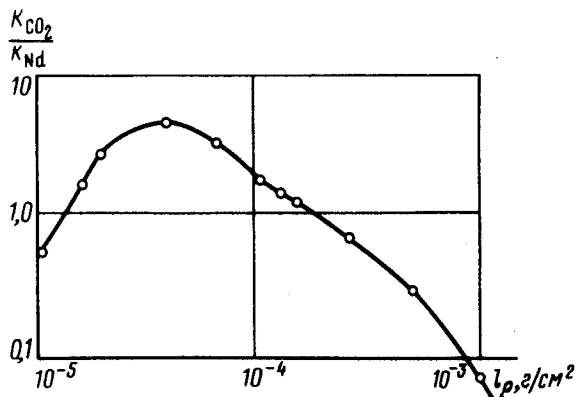


Рис. 1

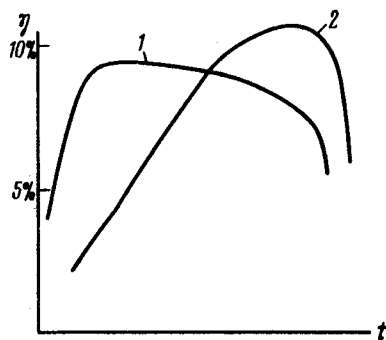


Рис. 2

Рис.1. Отношение коэффициентов усиления мишени при ее облучении CO_2 -и Nd-лазерами в зависимости от пробега замедления жестких электронов: 3

Рис.2. Гидродинамический КПД мишени в зависимости от времени: 1 — CO_2 -лазер, пробег электронов $5 \cdot 10^{-4}$ г/см²; 2 — Nd-лазер

Для проверки указанных эффектов были предприняты численные расчеты по упрощенному варианту программы "Луч". Расчеты проведены для мишени из ДТ-льда и легкого аблятора с аспектным отношением 100 и поглощенной энергии лазерного излучения около 100 кДж. На рис.1. представлена зависимость коэффициента термоядерного усиления при облучении CO_2 -лазером, отнесенного к коэффициенту усиления для Nd-лазера в зависимости от оптической толщины области, в которой выделяется энергия. Правая часть кривой соответствует равномерному нагреву всей мишени ("взрывающаяся" оболочка), левая часть кривой — концентрации энергии вблизи внешней границы, при некоторых оптических толщинах наблюдается ясно выраженный максимум, который превышает результат, полученный для Nd-лазера. На рис.2 представлены зависимости коэффициента гидродинамической передачи от времени для электронов с пробегом $l_p = 5 \cdot 10^{-4}$ г/см² и для излучения Nd-лазера. Обращает внимание быстрый рост η в случае $l_p = 5 \cdot 10^{-4}$ г/см², обусловленный проникновением электронов в плотные слои мишени, далее происходит насыщение этой величины, связанное с неоптимальным испарением оболочки. Эффект глубокого проникновения электронов мож-

но заметить также на r, t -диаграммах границ поглощения энергии и волны электронной теплопроводности (рис.3).

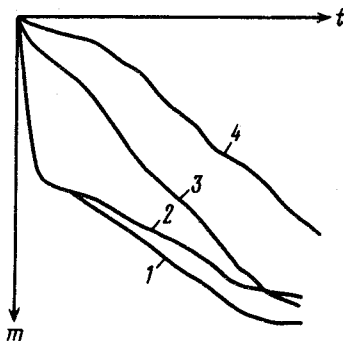


Рис.3. Зона тепловой волны при облучении мишени CO_2 -лазером (кривая 1, пробег электронов $5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^2$) и Nd-лазером (3). Граница области поглощения энергии (2 — CO_2 -лазер, 4 — Nd-лазер), r — массовая координата

В соответствии с результатом работы [6] энергия (температура T_H) быстрых электронов связана с потоком излучения и длиной волны соотношениями:

$$E_H = T_H = \begin{cases} 7,75 \cdot 10^{-10} (q \lambda^2)^{2/3} & 10^{11} \leq q \lambda^2 \leq 10^{15} \\ 1,38 \cdot 10^{-3} (q \lambda^2)^{1/4} & 10^{15} < q \lambda^2 \leq 10^{17} \end{cases}$$

Единица измерения: $[q]$ — Вт/см^2 , $[\lambda]$ — мкм , $[T_H]$ — кэВ . Согласно [11, 12] пробег электронов до замедления с учетом рассеяния есть:

$$l_p = (3 \div 9) \cdot 10^{-6} T_H^2 \text{ г/см}^2.$$

Оптической толщине $10^{-3} - 10^{-4} \text{ г/см}^2$ соответствует температура быстрых электронов в диапазоне $20 \div 5 \text{ кэВ}$ (рис.1).

С другой стороны, при энергии и длительности лазерного импульса $\approx 2 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ и $\approx 5 \text{ нсек}$ поток вблизи критической поверхности составляет $3 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{12} \text{ Вт/см}^2$. При таких значениях потока температура горячих электронов согласуется с указанными выше значениями $20 \div 5 \text{ кэВ}$.

Таким образом, разумный выбор условий облучения мишеней CO_2 -лазером дает принципиальную возможность сделать эти лазеры конкурентноспособными сравнительно с коротковолновыми лазерами с точки зрения их применения в реакторах в проблеме ЛТС.

Авторы благодарны Н.Н.Демченко, Е.Г.Гамалию, Ю.В.Афанасьеву за обсуждения затронутых выше проблем.

Поступила в редакцию
10 ноября 1980 г.

Литература

- [1] G.H. McCall. High density target experiments at LASL. Тезисы докладов на XIII Евр. конф. по взаимодействию лазерного излучения с веществом, 10 - 14 дек. 1979, Лейпциг, ГДР.
- [2] R.B. Perkins. The potentialities of CO₂-lasers for Inertial Fusion, Proc. of the Intern. Sci. Forum on an Acceptable Nucl. Energy, Nov. 7 - 11, 1977, Miami, USA, p.439.
- [3] C.W. Granfill. LA-6827-MS Los Alamos Sci. Lab., 1977.
- [4] G.H. McCall. Experience with the LASL 10 TW Eight Beam System. Тезисы докладов на XII Евр. конференции по взаимодействию лаз. излучения с веществом, Москва, 1978.
- [5] Laser Program Annual Report 1977, UCRL-50021-77, v. 1, 2.
- [6] D.B. Henderson, "Laser-fusion interaction in self-consistent classical light", LA-UR-77-1442, 1977.
- [7] J. Gitomer, B. Bezzerides, D. Forslund. Hot Electron Distribution in Resonance Absorption. Тезисы докл. на XIII Евр. конф., по взаимодействию лаз. излуч. с веществом, 10 - 14 дек., 1979, Лейпциг, ГДР.
- [8] Ю.В.Афанасьев, Е.Г.Гамалий, С.Ю.Гуськов, В.Б.Розанов. Препринт ФИАН №3, 1980.
- [9] F. Amiranoff, R. Benattar, R. Fabbro, E. Fabre, C. Garban, C. Popovich, J. Virmont, M. Weinfeld. Effect of Laser Wavelength and Pulse Duration in Laser Light Absorption and Plasma Heating. Тезисы докл. на XIII Евр. конф. по взаимодействию лаз. излучения с веществом, 10-14 дек., Лейпциг, ГДР.
- [10] A.A. Filyukov, P.P. Volosevich. "Simulation of Compression Driven by Frequency Tailored Irradiation", Тезисы докл. XIII Евр. конф. по взаимодействию лаз. излуч. с веществом, 10 - 14 дек., 1979, Лейпциг, ГДР.
- [11] Е.Г.Гамалий, В.Б.Розанов, С.А.Старцев. Препринт ФИАН №137, 1979.
- [12] V.V. Spenser. Phys. Rev., 98, 1597, 1955.