

## ЛАЗЕРНЫЙ МИКРОПИЧ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРЕВОМ ПЛАЗМЫ

В. А. Грибков, О. Н. Крохин

УДК 517.946

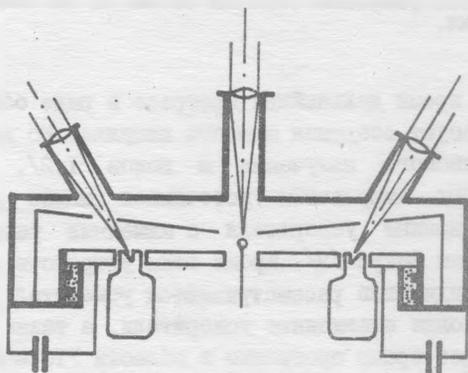
Предлагается новый способ иницирования разряда типа плазменного фокуса, который, сохраняя хорошие условия согласования камер с источником питания, позволит избавиться от потерь тока и чрезмерного уширения токовой оболочки на начальной стадии.

В настоящее время дальнейший прогресс в ряде областей физики и техники требует создания мощного импульсного источника нейтронов, рентгеновского излучения и ионов /1,2/. Среди существующих мощных импульсных источников можно назвать электронные и ионные ускорители с мишенями различного вида, а также плазменный фокус /3/. Кроме этих устройств в качестве потенциальных кандидатов рассматриваются ускорители с реакцией срыва, сверхзвуковые плазменные ускорители, а также все развиваемые в настоящее время программы в области УТС — как с магнитным, так и с инерциальным удержанием плазмы. Сравнительный анализ потенциальных возможностей этих источников приведен в /2/, а сравнение одного из них (плазменного фокуса) с импульсными источниками на основе реакций деления — в работе /4/. Наиболее важными недостатками этих устройств являются высокая стоимость, сложность (и, как следствие, относительно низкая надежность), необходимость экстраполяции энергетики установок на несколько порядков величины и трудности использования их в периодическом режиме работы.

Общий вывод, который, по нашему мнению, можно сделать на основе такого рода анализа, заключается в следующем. Если отвлечься от вопросов, связанных с к.п.д. и экономичностью уста-

новок, то наиболее надежными путями получения мощных наносекундных вспышек  $14$  Мэв-ных нейтронов, а также рентгеновского и корпускулярного излучения, обоснованными теоретически и экспериментально в наибольшей степени, являются сейчас инерциальный УТС (в особенности, ЛТС) и плазменный фокус (ПФ).

Оставляя в стороне вопросы, над которыми в настоящее время работают исследователи в ЛТС (разработка и изготовление сложных мишеней, физика сжатия, разработка и создание специальных лазеров и т.д.), в данной статье мы опишем предлагаемую нами новую схему получения мощных нейтронных вспышек, построенную на основе лазерной плазмы с использованием ряда эффектов ПФ, но свободную, как нам представляется, от недостатков последнего (рис. I).



Р и с. I. Принципиальная схема микропинчевой камеры с лазерным иницированием и комбинированным нагревом плазмы

Предлагаемая нами система представляет собой создаваемый лазерным излучением по окружности большого диаметра в вакууме плазменный лайнер специального вида. Последующий разряд быстрой конденсаторной батареи по такому лайнеру приведет к его пинчеванию вблизи оси. В дальнейшем, за счет явления "обрыва тока", значительная часть запасенной около микропинча магнитной энергии преобразуется в мощные потоки ионов и электронов /5/. Элект-

ронный поток в присутствии мощного лазерного излучения будет поглощаться в плазме с высокой эффективностью ("комбинированный лазерно-пучковой нагрев плазмы" /4/) и нагревать ее в режиме инерциального удержания. В свою очередь мощный ионный поток предполагается поглощать в специальной твердой мишени над анодом. Все это должно привести к генерации мощного нейтронного импульса из этого иницилируемого лазером микропинча.

Подробное обсуждение необходимых требований к такого рода установке, а также ее отличия и преимущества по сравнению с установками типа лазерной плазмы и плазменного фокуса будут описаны отдельно. Здесь мы укажем на важнейшие из них.

Известно /4/, что плазменный фокус можно трактовать как плазменный индуктивный накопитель (ПИН), в котором запасаемая в конденсаторной батарее энергия быстро высвобождается за счет "обрыва тока" в виде мощных потоков электронов и ионов, энергия которых поглощается в плазме пинча.

Как отмечалось в ряде работ, где предлагалось использовать ПФ с увеличенной батареей в качестве нейтронного источника /4,7/, эта установка обладает рекордными параметрами (в настоящее время абсолютный нейтронный выход  $\sim 10^{12}$  н/имп. (D-D), количество нейтронов на джоуль запасенной в батарее энергии  $\sim 2 \cdot 10^7$ , пиковый нейтронный поток  $\sim 10^{18}$  н/см<sup>2</sup>с и т.д.), возможности работы в режиме с высокой частотой повторения и хорошей масштабной закономерностью, объясняемой на основе механизма диссипации энергии рождаемых в ПФ потоков электронов и ионов в плотной плазменной мишени /4/ и (или) МГД сжатием плазмы /8/. При этом особую привлекательность плазменному фокусу придает то обстоятельство, что для выхода на минимально необходимый уровень абсолютного нейтронного выхода (порядка  $10^{16}$ – $10^{17}$  D-T-нейтронов) поднять энергию этих установок следует всего лишь на 1–1,5 порядка величины, тогда как к настоящему времени уже пройден "путь" более чем в 2 порядка по энергии, и проверено 100-кратное увеличение выхода при переводе ПФ на дейтерий-третиевую смесь на двух известных геометриях разрядной камеры /9/. Однако, несмотря на эти достоинства, в исследованиях последних лет выявился ряд недостатков ПФ, влияние которых на масштабную закономерность нейтронного выхода особенно резко возрастает при переходе к установкам большого раз-

Среди этих недостатков наиболее существенную роль играют следующие два: уменьшение относительной доли тока, протекающего через пинч, по сравнению с полным током, а также снижение энергии той части рождающихся в ПФ потоков электронов и ионов, которая, поглощаясь с высокой эффективностью в плазменной мишени, рождает мощную нейтронную вспышку /10,4/.

В предлагаемой нами системе ввиду инициирования разряда лазерным излучением вдали от изолятора, наличия хорошего начального вакуума, образования уже в начальный момент времени горячего плазменного лайнера и осуществления комбинированного пучково-лазерного нагрева плазмы эти недостатки не должны проявляться /4/.

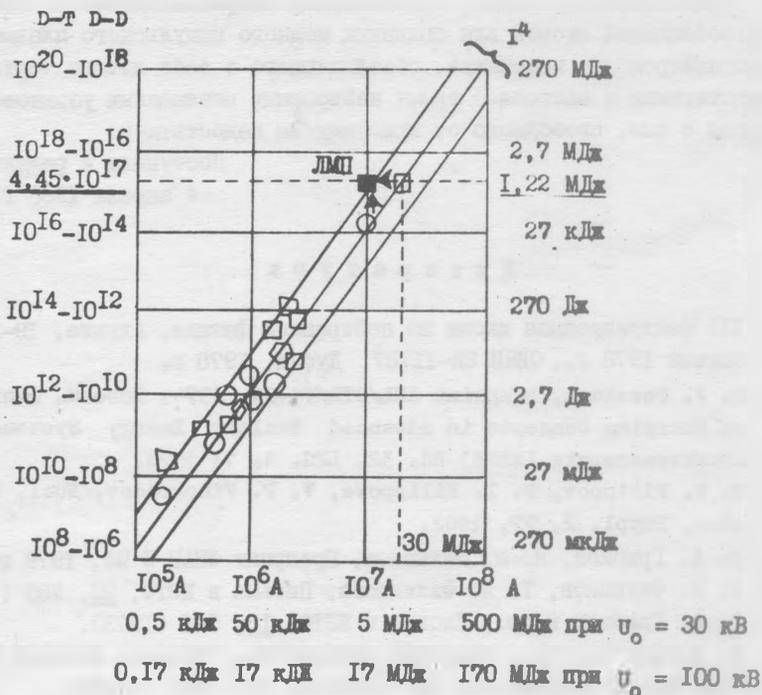
Учитывая, что в этом источнике энергия будет вкладываться в плазменную мишень с эффективностью порядка эффективности поглощения мощного лазерного излучения (комбинированный нагрев /10/ - для электронного потока, и классическое поглощение - для ионов), причем вещество пинча (для электронов и ионов) и твердой мишени (для ионов) будет после поглощения РЭИ и ионного потока свободно разлетаться, можно оценить полный нейтронный выход установки, зная к.п.д. преобразования энергии батареи в пучки. Это можно сделать двумя способами. Прежде всего, мы можем сделать оценку по масштабной закономерности, справедливой для плазменного фокуса /4/:  $N \propto I^4$  (где  $I$  - ток разряда) принимая, однако, во внимание, что в данном случае весь ток будет протекать через пинч. Это означает, что мы можем использовать в таблице экспериментальных данных по установкам, работающим в различных лабораториях мира, не средние, а лучшие выстрелы. Из рис. 2 видно, что при таком рассмотрении нейтронный выход должен составить величину порядка  $10^{16}$ - $10^{17}$  для смеси дейтерия с тритием в случае тока 10 МА (энергия батареи  $\sim 3 - 5$  МДж).

С другой стороны, как известно, элементарная оценка для ЛТС с использованием твердой мишени без сватих:

$$n\tau \geq 10^{14} \text{ с/см}^3 \rightarrow n = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3} \rightarrow \tau \geq 2 \cdot 10^{-9} \text{ с} \rightarrow c_{10^8} \text{ К} = \\ = \sqrt{\gamma kT/M} \sim 10^8 \text{ см/с} \rightarrow r_{\text{мишени}} \geq \sigma \tau = 0,2 \text{ см}$$

приводит к необходимой (для осуществления энергетически выгодной термоядерной реакции) энергии лазера:

$$E = 4/3 \gamma \frac{3}{2} nkT \approx 5 \cdot 10^6 \text{ Дж (полное количество нейтронов при этом составляет величину порядка } 2 \cdot 10^{18} \text{)}.$$



Р и с. 2. Масштабная закономерность для современных установок "Плазменный фокус"

Как известно, к.п.д. преобразования энергии батареи ПФ в электронные и ионные пучки составляет величину от 3 до 20% [4]. Для среднего значения 10% при указанной выше энергетике батарей<sup>9</sup> получаем энергосодержание в пучках  $\sim 300 - 500 \text{ кДж}$ . При токах  $\sim 10 \text{ MA}$  реально достигшие плотностей в пинче  $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , что на порядок превышает те, которые достигнуты в современных установках ( $n \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) при токах  $\sim 1 \text{ MA}$ . При этом, как не трудно видеть из соотношения Беннета, конечная температура в плазме пинча после передачи ей энергии потоков электронов и ионов окажется порядка 10 кэВ, а нейтронный выход составит те же величины  $\sim 10^{14}-10^{15}$  и  $\sim 10^{16}-10^{17}$  для дейтерия и дейтерий-тритиевой смеси, соответственно.

Таким образом, видно, что лазерный микропинч является весьма многообещающей схемой для создания мощного импульсного плазменного нейтронного источника, объединяющего в себе лучшие черты существующих в настоящее время нейтронных плазменных установок и, вместе с тем, свободного от присущих им недостатков.

Поступила в редакцию  
4 апреля 1980 г.

### Л и т е р а т у р а

- I. III Международная школа по нейтронной физике. Алушта, 19-30 апреля 1978 г., ОИЯИ ЗД-II787, Дубна, 1978 г.
  2. P. J. Persiani, Preprint ANL/CTR/74-01, 1974; Intern. Conf. on Emerging Concepts in Advanced Nuclear Energy Systems, Atomkernenergie (ATKE) Bd. 32, IFG. 1, 1; 1978.
  3. N. V. Filippov, T. I. Filippova, V. P. Vinogradov, Nucl. Fusion, Suppl. 2, 77, 1962.
  4. В. А. Грибков, Н. В. Филиппов, Препринт ФИАН № 94, 1979 г.
  5. Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, Письма в ЖЭТФ, 29, 750 (1979).
  6. В. А. Грибков и др., Письма в ЖЭТФ, 18, 541 (1973).
  7. O. Zucker et. al., Preprint UCRL-76896, 1975; A. Bernard et. al., Nucl. Instruments and Methods, 145, 191 (1977).
  8. V. S. Imshennik, N. V. Filippov, T. I. Filippova, Nucl. Fusion, 13, 929 (1973).
  9. J. W. Mather, "Methods of Exp. Phys.", 9B, 222, Academic Press, N-Y, (1971). В. П. Выскубов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН №12,37(1979).
  10. Ch. Maisonnier et. al., Extended Synopses, 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., IAEA-CN-37, V-3-1, p. 87, Innsbruck, Austria, 1978.
- II. В. А. Грибков и др., Физика плазмы, 4, 1056 (1978).