

## ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС КАК ИСТОЧНИК ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ПРОБЛЕМЕ УТС

В.А. Грибков, А.В. Дубровский, Н.В. Калачев, О.Н. Крохин, П.В. Силин, В.Я. Никулин, Ю.Н. Чеблуков<sup>\*1)</sup>

УДК 533.9

*Экспериментально продемонстрировано, что плазменный фокус при облучении анода мощным лазерным излучением оказывается весьма перспективным источником ионов для тяжелоионного УТС.*

В последнее время большой интерес вызывает возможность осуществления термоядерного синтеза с помощью пучков тяжелых ионов высокой энергии. Появился ряд проектов энергетических термоядерных установок с поджигом тяжелыми ионами. При этом цель состоит в построении ускорительно-накопительного комплекса (драйвера), который должен обеспечивать выделение необходимой мощности на термоядерной мишени /1-6/. Оценки показывают /6/, что за время 20-30 нс на термоядерную мишень должно быть направлено  $> 10^{15}$  тяжелых ионов ( $A > 200$ ), ускоренных до энергии 10-20 ГэВ/ядро.

В связи с этим появилась острая потребность в создании интенсивных источников многозарядных ионов. Требуемые параметры этих источников несколько различны в зависимости от типа драйвера. Отметим требования, предъявляемые к источникам для двух типов драйверов.

1. Ток тяжелоионного пучка — несколько десятков ампер, длительность импульса — несколько микросекунд, частота повторения импульсов 10 Гц, эмиттанс  $\epsilon \leq 0,1$  см·мрад /5/.

2. Ток тяжелоионного пучка — 50-100 мА, длительность импульса — 5 мс, частота повторения импульсов — 10 Гц, эмиттанс  $\epsilon \leq 0,1$  см·мрад /6/.

Кандидатами в источники ионов для драйверов рассматриваются лазерные источники /7/ и плазменный фокус (ПФ), работающий в довольно экзотическом режиме — напряжение на электродах  $V \approx 500$  кВ /5/, что на наш взгляд является большим неудобством в эксплуатации. В данном сообщении мы предлагаем использовать в качестве источника многозарядных ионов ПФ,

<sup>\*1)</sup> Институт теоретической и экспериментальной физики, г. Москва.

работающий в обычной схеме его эксплуатации ( $V = 20$  кВ,  $W = 50$  кДж), в сочетании с неодимовым лазером. При помощи лазера производится впрыскивание необходимых ионов в плазму в момент времени, предшествующий периоду генерации в этой установке потока быстрых ионов. Для выяснения указанной возможности нами были предприняты эксперименты с впрыскиванием ионов меди в ПФ.

Основными требованиями, которым надо было удовлетворить в данном способе формирования потока ионов, являются следующие.

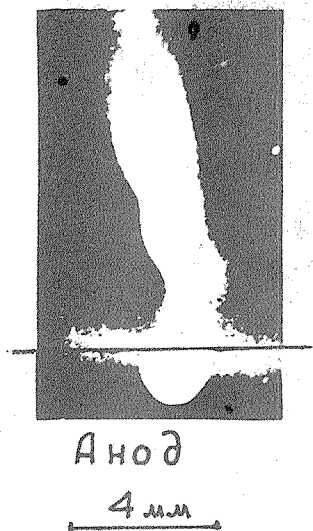
1. Должна иметься возможность впрыскивать в ускорительную область данного плазменного ускорителя ионы необходимого элемента. Это может быть достигнуто помещением в центр анода вставки из требуемого элемента.

2. Область ускорения не должна перемещаться от выстрела к выстрелу ПФ в радиальном направлении. Наши эксперименты показали, что зона формирования плазменного сгустка всегда оказывается в данной схеме эксперимента в области фокусировки лазерного излучения.

3. Ускорительные процессы в ПФ не должны подавляться из-за впрыскивания дополнительного количества вещества в область фокусировки плазмы. Наши эксперименты показали, что заметного смягчения спектра жестких излучений ПФ не происходит при энергии лазерного излучения менее 5 Дж в импульсе длительностью 2 нс. В то же время при этом осуществляется впрыскивание достаточного количества тяжелых ионов, которое, однако, гораздо меньше полного количества собственных ионов пинча ( $N_{pi} \approx 10^{19}$  частиц).

4. Не должен ухудшаться эмиттанс генерируемых пучков тяжелых ионов. На рис. 1 показана обскурограмма области ПФ, где происходит ускорение, в случае впрыскивания ионов меди. Видно, что при длине более 1 см диаметр плазменного столба не превышает 300 мкм. Уменьшение диаметра до таких размеров легко находит объяснение при учете радиационного охлаждения пинча. В то же время оценка величины эмиттанса с учетом геометрии сформированного в наших экспериментах пинча показывает, что его величина  $\epsilon = \beta \gamma a r d r / d z < 0,1$  см-мрад оказывается вполне удовлетворительной ( $a$  — начальный, а  $r$  — текущий радиусы пучка,  $\beta$  и  $\gamma$  — релятивистские факторы).

Преимущества описанного способа формирования пучка ионов очевидны. Ввиду сжатия до размера  $\leq 0,3$  мм требуемое малое значение эмиттанса  $\epsilon < 0,1$  см-мрад уже достигнуто в настоящее время; необходимое число частиц ( $10^{15}$  и более) также обеспечивается, а низкое начальное напряжение на используемом источнике питания создает удобство в эксплуатации. Особенно следует отметить преимущество ПФ в сочетании с неодимовым лазером перед чисто лазерным источником. Энергия ионов из ПФ превышает



Р и с. 1. Обскурограмма инициированного лазером пинча в Плазменном фокусе

1 мэВ, что на порядок больше, чем для лазерного источника. Это приведет к меньшим потерям пучка из-за кулоновского расталкивания на начальном этапе ускорения в драйвере и к увеличению предельного тока пучка, поступающего в последующие ускорительные каскады.

При реализации драйвера второго типа общим недостатком импульсных источников является необходимость создания между источником и ускорителем пролетной базы для растягивания импульса до 5 нс, что приводит к большим потерям тока. При использовании ПФ ( $V = 20$  кВ) этот недостаток можно обойти. Для этой цели можно использовать индуктивный накопитель энергии и перевести ПФ в режим, когда будет осуществляться серия последовательных сжатий и, следовательно, генераций импульсов ионов в течение одного разряда. Подобрать правильно геометрию электродов, газовое наполнение и энергозапас индуктивного накопителя можно получать длительную серию импульсов тяжелых ионов, что снимает трудности, связанные с созданием большой пролетной базы.

Учитывая все сказанное, мы считаем, что ПФ ( $V = 20$  кВ,  $W = 50$  кДж) в сочетании с неодимовым лазером — перспективный источник тяжелых ионов, который обладает перечисленными выше преимуществами перед другими источниками для создания обоих типов драйверов.

Поступила в редакцию 16 февраля 1984 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ERDA Summer Study of Heavy Ions for Inertial Fusion, LBL-5543, USA, 1976.
2. Proc. of the Heavy Ion Fusion Workshop, BNL-50769, USA, 1977.
3. Proc. of the Heavy Ion Fusion Workshop, ANL-79-41, USA, 1978.
4. Proc. of the Heavy Ion Fusion Workshop, LBL-103-0,1, USA, 1980.
5. M.J. Rhee, Appl. Phys. Lett., 37, № 10, 906 (1980).
6. П.Р. Зенкевич и др., Препринт ИТЭФ, № 64, М., 1981 г.
7. Л.З. Барабаш и др., Препринт ИТЭФ, № 126, М., 1981 г.