

УДК 533.95

ФОРМИРОВАНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПУЧКА НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

В. Я. Никулин¹, В. Н. Колокольников², П. В. Силин¹, С. Н. Полухин¹

В работе рассмотрен способ формирования и вывода однородного ионно-плазменного пучка с помощью металлических диафрагм на установке Плазменный фокус мейзеровского типа. Представлены результаты взаимодействия ионно-плазменных пучков с металлическими фольгами: Al, Cu и стеклами. Показано, что плотность потока энергии ионно-плазменного пучка, поглощенного в мишени, достигает величины $\sim 2 \cdot 10^8$ Вт/см².

Ключевые слова: плазменный фокус, ионно-плазменный пучок, металлические фольги, стекла.

Введение. Установки типа Плазменный фокус (ПФ) являются источниками импульсной высокотемпературной плазмы [1]. Особенностью установок является генерация мощных потоков плазмы и пучков быстрых ионов при схождении на оси установки ПФ нецилиндрической токово-плазменной оболочки (ТПО). В работах [2–5] было установлено, что плазменные сгустки и ионные пучки распространяются со скоростью, превышающей 10^7 см/с. В работах [6, 7] показано, что установки ПФ мейзеровского типа можно с успехом использовать при решении ряда прикладных задач. Однако неравномерное распределение энергии по сечению плазменного пучка приводит к неоднородному распылению материала потоком плазмы, что затрудняет применение установок для решения ряда прикладных задач. Целью работы являлось получение более однородного плазменного пучка на установке ПФ мейзеровского типа путем выделения наиболее интенсивной части плазменного потока с помощью металлических диафрагм.

Экспериментальная часть. В работе использовалась электроразрядная установка типа Плазменный фокус мейзеровского типа ПФ-4 (ФИАН) [7]. Установка имела коаксиальную систему электродов (рис. 1), состоящую из анода и катода с диаметрами

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: nikulinvy@lebedev.ru.

² ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 49.

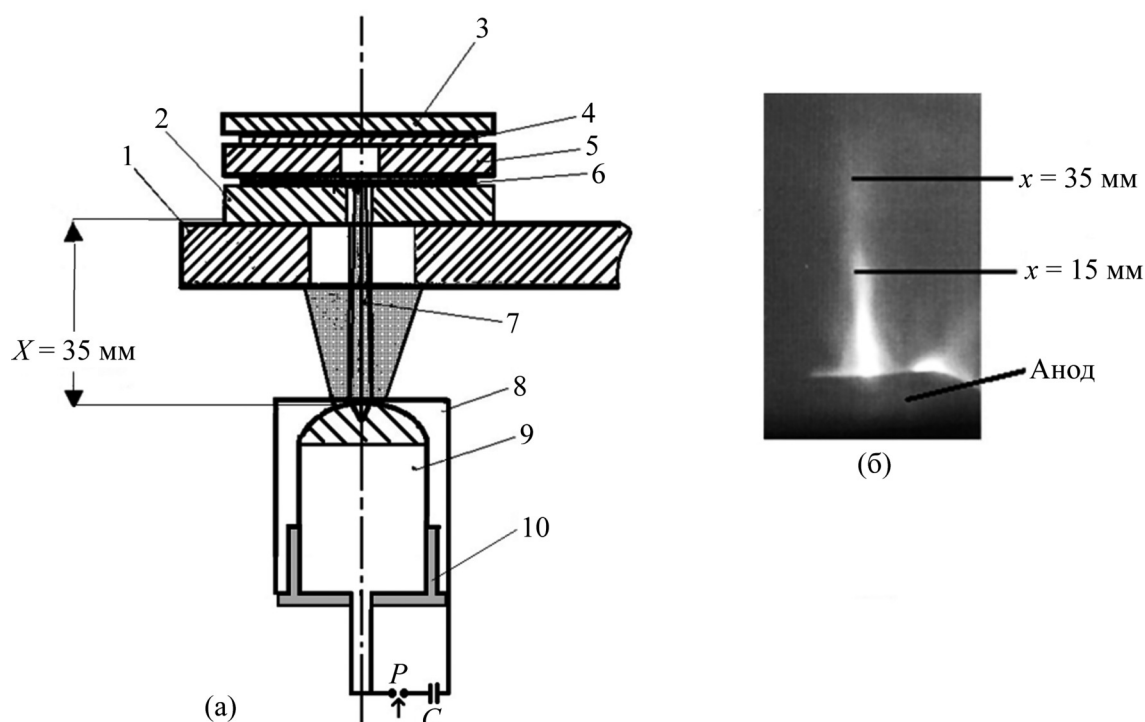


Рис. 1: (а) Приспособление для выделения ионно-плазменного пучка из потока плазмы и система электродов установки ПФ-4: 1 – пластина держателя; 2 – диафрагма 1; 3 – прижимной диск; 4 – стеклянная пластинка; 5 – диафрагма 2; 6 – металлическая фольга; 7 – ионно-плазменный пучок; 8, 9 – катод и анод установки ПФ-4; 10 – изолятор; С – конденсаторная батарея; Р – управляемый разрядник; (б) изображение в видимом свете ионно-плазменного пучка над анодом установки ПФ-4.

соответственно 50 и 30 мм. Электроды изготовлены из меди. Анод от катода отделен изолятором из вакуумно-плотной керамики. Разрядная камера установки ПФ заполнялась газом N_2 до давления 1 Торр. Запасаемая энергия в конденсаторной батарее была ~ 3.5 кДж, разрядный ток ~ 250 кА. Длительность воздействия ионно-плазменного импульса менее 100 нс.

На рис. 1(а) показано приспособление для выделения ионно-плазменного пучка из потока плазмы и система электродов установки ПФ-4. Металлические фольги из Al и Cu, имеющие размеры 20×20 мм при толщине от 20 до 120 мкм, подвергались воздействию ионно-плазменных пучков, проходящих через систему диафрагм 1 и 2. Образовавшееся в результате воздействия плазменных потоков облако расплавленных материалов из Cu и Al осаждалось на стеклянные пластинки толщиной 1.5 мм размером

20×20 мм. Диафрагмы 1 и 2 изготавливались из нержавеющей стали типа X18H10T толщиной 5 мм. Диафрагмы 1 имели отверстия диаметром 2.5; 3.0 и 4.0 мм. Диафрагма 2 имела отверстие диаметром 4 мм. Диаметр отверстия в пластине держателя образца был равен 10 мм. Металлические фольги и стеклянные пластинки устанавливались на специальном держателе, который вводился с использованием штока в вакуумную камеру (рис. 1(а)).

Эксперименты выполнялись при максимально близком расстоянии 35 мм от анода установки до диафрагмы 1, что позволяло использовать наиболее интенсивную часть плазмы без электрического пробоя на держатель образца (рис. 1(а),(б)).

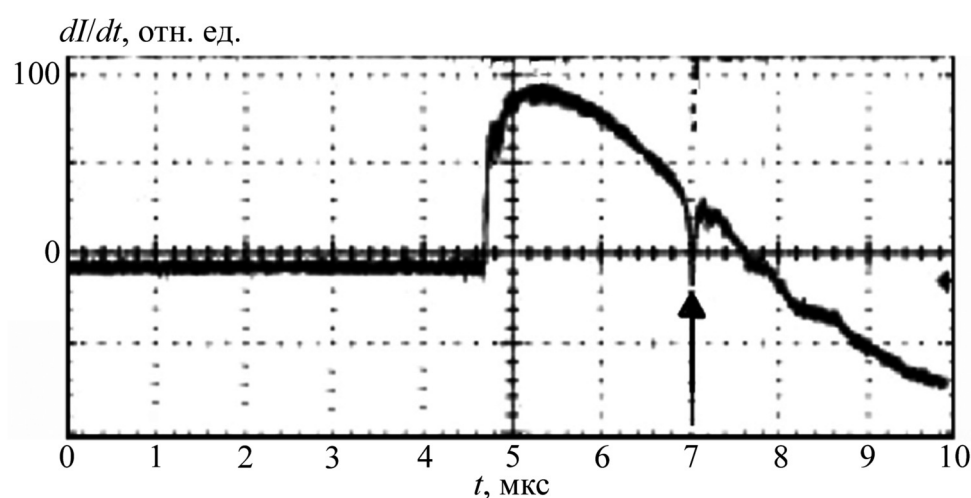


Рис. 2: Производная разрядного тока. Стрелкой указана особенность.

Интенсивность ионно-плазменного пучка в относительных единицах контролировалась посредством регистрации амплитуды особенности на производной разрядного тока. Особенность – это короткий импульс на производной разрядного тока, регистрируемый датчиком магнитного поля в момент максимального сжатия плазмы на оси установки ПФ (рис. 2). Она характеризует эффективность трансформации энергии магнитного поля, создаваемого разрядным током, в энергию плазменных потоков и пучков ионов и электронов.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 3 и 4 приведены типичные результаты воздействия ионно-плазменного пучка на стеклянную пластинку и металлические фольги при различных диаметрах отверстий в металлических диафрагмах. Амплитуда особенности в этой серии экспериментов составляла величину 80–100 отн. ед.

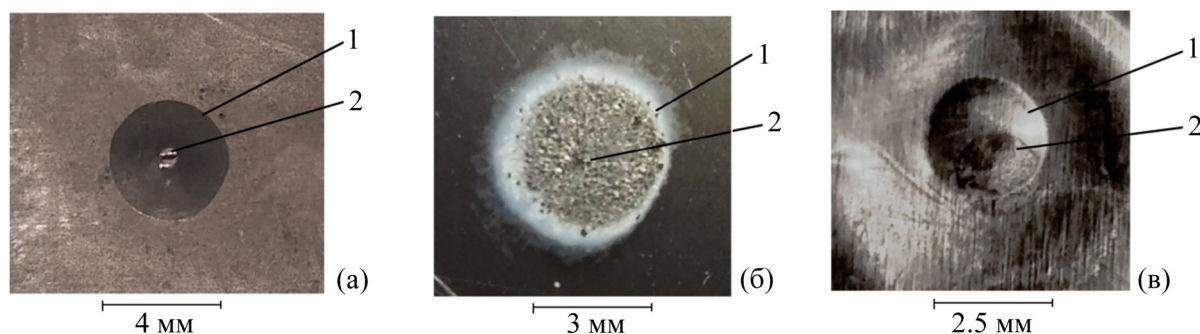


Рис. 3: Воздействие N_2 плазмы: 1 – область воздействия плазменного сгустка; 2 – воздействие ионного пучка: (а) медная фольга толщиной 32 мкм, отверстие диафрагмы $\varnothing 4$ мм. Амплитуда особенности 100 отн. ед.; (б) стеклянная пластинка (без фольги), отверстие диафрагмы $\varnothing 3$ мм. Амплитуда особенности 80 отн. ед.; (в) алюминиевая фольга толщиной 70 мкм, отверстие диафрагмы $\varnothing 2.5$ мм: амплитуда особенности 80 отн. ед.



Рис. 4: Формирование конуса, выдавленного плазмой в медной фольге толщиной 32 мкм при воздействии ионно-плазменного пучка. Диафрагма – 4 мм. Диаметр основания конуса – 4 мм.

При сопоставимых потоках энергии плазмы, воздействие плазмы на фольги и стекло зависит от материала и его толщины.

На всех образцах наблюдаются две характерные области воздействия плазмы – область малого размера $\sim 0.3\text{--}0.5$ мм и область порядка диаметра отверстия диафрагмы, при этом оплавления поверхности фольг практически не наблюдается [10].

На тонких (до 50 мкм) медных фольгах формируется конус, выдавленный плазмой (рис. 3(а) и рис. 4), что характерно для действия сосредоточенной силы на круглой пластине [11]. В данном случае роль этой силы, по-видимому, выполняют высокоскоростные ионные пучки, на существование которых указывалось в работах [4, 5]. От-

метим, что ионный пучок образуется за счет ускорения ионов в сильном аксиальном электрическом поле, генерируемым в момент так называемого обрыва тока. Средняя энергия ионов в пучке может достигать величины более 100 кэВ. В результате этого аксиальная скорость ионов значительно превышает поперечную тепловую скорость, что проявляется в более узкой направленности пучка ионов по сравнению с направленностью плазменного потока [5].

При воздействии ионно-плазменного потока на поверхность стеклянных пластинок наблюдается ее оплавление (рис. 3(б)). В центральной зоне наблюдается лунка с более сильным разрушением стекла.

На более толстых (50–120 мкм) Al фольгах деформация поверхности имеет вид лунки (рис. 3(в)), что обычно связано с действием равномерно распределенной нагрузки [11] и может быть отнесено к преобладающему действию плазменного сгустка. Эта картина взаимодействия плазмы с фольгами согласуется с результатами работы [2], где показано увеличение плазменного сгустка $\varnothing 1$ мм в ~ 3 –5 раз на расстоянии ~ 30 мм от анода установки и его последующее разрушение.

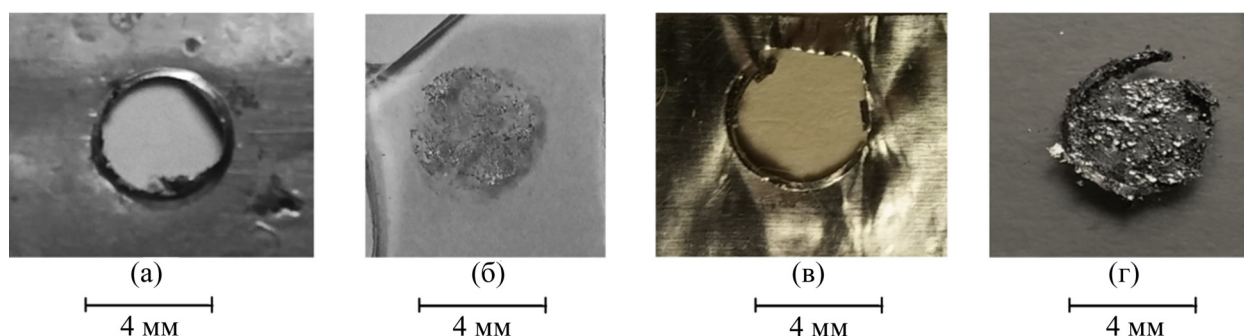


Рис. 5: Воздействие плазмы N_2 на металлические фольги через диафрагму $\varnothing 4$ мм при амплитуде особенности 110 отн. ед.: (а) фольга Si толщиной 32 мкм и (б) стеклянная пластинка с осажденной Si; (в) фольга Al толщиной 52 мкм и (г) стеклянная пластинка с осажденным Al (г).

При сравнительно небольшом увеличении амплитуды особенности (110 отн. ед.) наблюдается резкое возрастание энергии плазмы, поглощаемой фольгами (рис. 5). В этом случае плавление фольг имеет место по всему отверстию диафрагмы, что указывает на достаточно однородное распределение энергии в плазменном потоке. При этом выброс расплавленного и осажденного металла на стеклах, установленных сзади металлических фольг, практически повторяет форму отверстий диафрагм. Факт плавления фольг

установлен изучением их поверхностной структуры с помощью оптического микроскопа МИМ-7 при увеличении 30-100х.

Для оценки энергии, поглощенной металлическими фольгами, измеряли унос металла при однократном воздействии ионно-плазменного пучка. Взвешивание фольг выполняли на аналитических весах ВЛР-200. При расчетах поглощенной металлическими фольгами энергии учитывались энтальпия и количество тепла, затраченного на плавление унесенной массы металла, а также температурная зависимость теплоемкости [8, 9]. Процессы, связанные с образованием металлического пара, не учитывались.

Эксперименты показали, что унос массы металла при однократном воздействии ионно-плазменного пучка меняется в зависимости от амплитуды особенности, материала фольг, расстояния от диафрагмы до анода ПФ в пределах 2–3 мг. Расчет поглощенной металлическими фольгами энергии дал величину 2–3 Дж, при погрешности менее 30%. При длительности импульса плазмы ~ 100 нс и с учетом площади отверстия, прожигаемой плазмой в фольгах, плотность потока энергии составляет величину $\sim 2 \cdot 10^8$ Вт/см². Указанная величина плотности потока энергии сравнима с той, которая генерируется в оптических квантовых генераторах средней мощности с модулированной добротностью.

Заключение. Предложен способ получения достаточно однородного ионно-плазменного пучка диаметром $\sim \varnothing 4$ мм путем установки металлических диафрагм. Однородное распределение энергии в ионно-плазменном пучке подтверждается распыленным металлом на поверхности стекол. Выполнены оценки плотности потока поглощенной энергии ионно-плазменного пучка, величина которой оказалась равной $\sim 2 \cdot 10^8$ Вт/см². Энергия ионно-плазменного пучка, попадающего на мишень, существенно зависит от амплитуды особенности на производной тока, расстояния от диафрагм до анода установки, а также диаметра отверстий диафрагм.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда – грант № 16-12-10351.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Д. П. Петров, Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, В. А. Храбров, в: Сб. *Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций*. Под ред. М.А. Леонтович (М., Изд-во АН СССР, 1958), т. 4, с. 170.

- [2] С. Н. Полухин, А. Е. Гурей, В. Я. Никулин и др., *Ядерная физика и инжиниринг* **7**(5), 458 (2016); DOI: 10.1134/S2079562916050146.
- [3] Е. О. Баронова, О. А. Башутин, В. В. Вихрев и др., *Физика плазмы* **38**(9), 815 (2012).
- [4] V. A. Evtikhin, I. E. Lyublinsky, A. V. Vertkov, et al., *NUKLEONIKA*, **46**(Supplement 1):S113–S115 (2001).
- [5] V. A. Gribkov, A. Banaszak, B. Bienkowska, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 3592 (2007); doi: 10.1088/0022-3727/40/12/008.
- [6] G. Mikhailova, L. Antonova, I. Borovitskaya, et al., *Phys. Status Solidi C* **10**, 689 (2013).
- [7] Б. П. Михайлов, Л. И. Иванов, И. В. Боровицкая и др., *ДАН* **442**(5), 614 (2012).
- [8] А. К. Кикоин, И. К. Кикоин, *Молекулярная физика* (М., Наука, 1976).
- [9] В. Е. Зиновьев, *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник* (М., Металлургия, 1989), 384 с.
- [10] V. N. Kolokoltsev, V. Ya. Nikulin, I. V. Borovitskaya, et al., *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* **1134**, 012026 (2018), doi:10.1088/1742-6596/1134/1/012026.
- [11] С. П. Тимошенко, *Курс теории упругости*. Под ред. Э. И. Григолюка (Киев, Наукова Думка, 1972), 508 с.

Поступила в редакцию 9 сентября 2019 г.

После доработки 15 ноября 2019 г.

Принята к публикации 20 ноября 2019 г.