

СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ, КЛАСТЕРНЫХ СПРЕЙНЫХ И ЖИДКОСТНЫХ МИШЕНЕЙ В ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. В. Е. Гусева^а, М. А. Корепанов^б, М. Р. Королева^б, А. Н. Нечай^{с,*},
А. А. Перекалов^с, Н. Н. Салашенко^с, Н. И. Чхало^с

^аНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

^бУдмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Россия, 426065, Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

^сИнститут физики микроструктур РАН
Россия, 603087, Нижний Новгород, ГСП-105

*e-mail: nechay@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 02.11.2022 г.

После доработки 28.11.2022 г.

Принята к публикации 16.01.2023 г.

Рассматриваются способы формирования жидкостных, микрокапельных, кластерных и газовых мишеней в вакууме для использования в лазерно-плазменных источниках излучения. Приведены характеристики используемых систем формирования мишени и систем напуска газа на их основе. Данные системы формируют импульсные и статичные струи с малым массовым расходом, порядка ~70 мл/ч жидкости или 1500 см³/ч газа, что позволяет проводить откачку вакуумного объема одним турбомолекулярным насосом с производительностью 1000 л/с.

DOI: 10.31857/S0032816223030217, EDN: CVWMRJ

ВВЕДЕНИЕ

Формирование устойчивых малорасходных жидкостных и газовых струй, истекающих в вакуум, само по себе является довольно сложной технической задачей. Данные системы применяются во множестве лабораторных устройств, а одним из наиболее востребованных применений является использование в составе лазерно-плазменных источников излучения (ЛПИ) [1].

В настоящей статье приводятся полученные авторами результаты разработки систем формирования газовых, кластерных, микрокапельных и жидкостных струй-мишеней для применения в ЛПИ. Для использования в составе лабораторных ЛПИ к системе формирования подобных струй предъявляют дополнительные требования, такие как малые расходы, большая плотность вещества и стабильность характеристик струи.

Малые расходы используемых систем формирования мишени в ЛПИ диктуются применением откачных систем с приемлемой мощностью. Если для жидкостных систем еще могут применяться криогенные насосы, охлаждаемые жидким азотом, для которых характерны высокие скорости откачки, то для газоструйных источников откач-

ка должна проводиться турбомолекулярными насосами, суммарная производительность которых не превышает 1000 л/с. Использование либо турбомолекулярных насосов производительностью более 1000 л/с, либо групп насосов приводит к резкому усложнению установки и переводу ее из разряда обычной лабораторной техники в разряд специальных устройств.

Плотность газовой струи ЛПИ является важным параметром, определяющим свойства самого источника излучения. Высокая плотность вещества в мишени необходима для быстрого развития лазерного пробоя и формирования разогретой плазмы, эффективно излучающей в коротковолновом диапазоне длин волн.

Стабильность характеристик получаемых струй – важнейшее свойство системы формирования мишени. Наличие частых сбоев либо дрейф плотности струи со временем приводят к невозможности использования подобного источника в сколько-нибудь ответственных лабораторных измерениях. Достижение высокой технической готовности и стабильности характеристик источника струи является наиболее длительной и тяжелой стадией доводки источника. Вместе с тем данной

стадий работ часто пренебрегают в угоду быстроте реализации проекта.

Используемые технические решения для создания подобных струйных мишеней можно разбить на два варианта – системы постоянного истечения либо импульсные системы.

При использовании систем постоянного истечения требование малых расходов приводит к необходимости использования сопел малого сечения. Для жидкостных систем в таком случае резко возрастает влияние поверхностных сил в процессе отрыва струи от среза сопла. Нивелировать данные воздействия можно, существенно повышая давление жидкости на входе в сопло. Для газоструйных источников требование малости расхода также приводит к необходимости использования сопел малого сечения и уменьшения давления газа на входе в сопло, что, в свою очередь, приводит к резкому падению плотности формируемой газовой струи. Выходом из данной ситуации является использование профилированных газовых сопел. Данные сопла позволяют создать направленную струю газа, существенно увеличив плотность струи в зоне формирования лазерной искры. Наилучшими соплами являются сопла Лаваля, но наибольшее применение нашли технологичные конусные сопла.

Использование импульсных систем позволяет увеличить сечение сопел, но требует применения быстродействующих клапанов. К клапанам предъявляется ряд важных требований, таких как быстрота коммутации струи, малые утечки в закрытом положении, надежность, большой ресурс и т.д.

Ниже приведены варианты технического облика систем формирования струй в вакууме при откачке турбомолекулярным насосом производительностью 1000 л/с:

– система формирования постоянной жидкостной струи [2–5]: капилляр очень малого диаметра (~5 мкм), на входе в который создается большое (до 100 бар) давление жидкости, дополнительно сопло может подвергаться вибрации [6] для формирования капель;

– система формирования постоянной газовой и кластерной струй [7]: коническое сопло малого критического сечения (~150 мкм), длиной 5 мм, на входе в которое создается умеренное давление (<5 бар);

– система формирования импульсной жидкостной и микрокапельной струй [8–10]: цилиндрическое сопло среднего диаметра (~200 мкм), на входе в которое создается умеренное давление (~5 бар);

– система формирования импульсной газовой и кластерной струй [11–13]: коническое сопло большого критического сечения (~500 мкм), на входе в которое создается большое давление (~25 бар).

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ УСТАНОВКА

Нами были проведены исследования, включившие в себя разработку всех четырех вариантов формирования жидкостных и газовых струй в вакууме, используемых как мишени в ЛПИ. Использовалась исследовательская установка, подробно описанная в работе [14]. Схема установки приведена на рис. 1.

Установка представляет собой вакуумную камеру, откачиваемую криоконденсационными и криосорбционными насосами. В объеме камеры основной поток газа откачивается криогенным конденсационным насосом 13 с очень высокими скоростями откачки. Изготовленный специально для установки насос имеет известную конструкцию: два вложенных друг в друга цилиндра, спаянных у торцов, помещенных в вакуумную камеру. Криоагент, как правило жидкий азот, подается в пространство между цилиндрами. При использовании в качестве криоагента жидкого азота насос может эффективно откачивать высококипящие газы, такие как ксенон, вода, фреоны и др. Использование такого насоса позволяет эффективно капсулировать в слое намораживаемого льда агрессивные газы, такие как фтор, хлор, бром, кислород, образующиеся при возбуждении лазерным излучением молекулярных газов. Газы, не сконденсировавшиеся на криоконденсационном насосе, эффективно откачиваются двумя криоадсорбционными насосами 14 марки КВ 250-3.2 меньшей производительности, последовательно расположенными за криоконденсационным насосом. Данная система сохраняет работоспособность при внезапном прорыве вакуума либо разрушении сопел.

Исследуемая система формирования струйных мишеней закрепляется на трехкоординатной системе позиционирования, позволяющей ее перемещать относительно точки фокуса оптической системы. К данной системе подведены гибкие трубки системы питания газом либо жидкостью.

В случае питания сопла 7 газом работа системы осуществляется следующим образом. Давление газа на входе в сопло регулируется редуктором и игольчатым вентилем, измерение давления осуществляется образцовым манометром. Для измерения расхода газа через сопло закрывается игольчатый вентиль и измеряется время истечения газа из специального мерного объема. Температура газа, подаваемого в сопло, регулируется путем охлаждения газообразным криоагентом (азотом) при переменном расходе, что позволяет плавно регулировать температуру в диапазоне 140–350 К. Газообразный криоагент образуется путем испарения жидкого азота с помощью электрического нагревателя. Затем криоагент по теплоизолированному трубопроводу подается в теп-

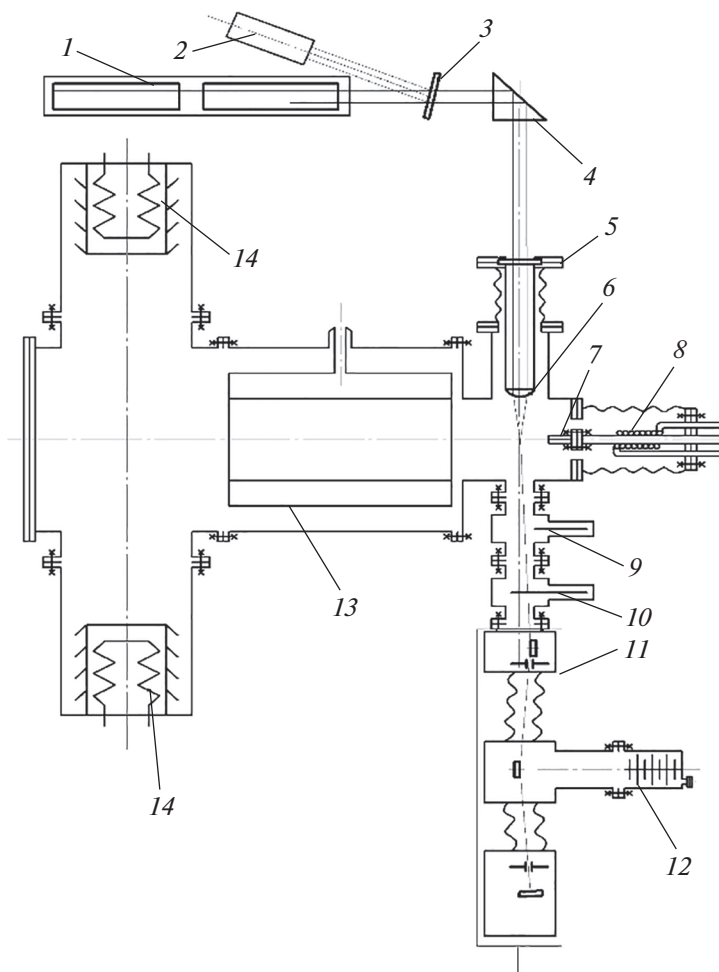


Рис. 1. Установка для исследования свойств атомно-кластерных пучков. 1 – лазер; 2 – детектор мощности излучения; 3 – делительная пластинка; 4 – призма; 5 – оптический ввод; 6 – линза; 7 – сопло; 8 – теплообменник; 9 – вакуумный затвор; 10 – диафрагма; 11 – рентгеновский спектрометр РСМ-500; 12 – турбомолекулярный насос; 13 – криоконденсационный насос; 14 – криоадсорбционный насос.

лообменник, закрепленный перед соплом. Температура газа измеряется с помощью термодатчика Pt1000, закрепленного непосредственно на сопле.

В случае питания сопла 7 жидкостью работа системы осуществляется следующим образом. Сжатый газ через редуктор подается в емкость с жидкостью. Далее жидкость под давлением подается к соплу, измерение давления осуществляется образцовым манометром. Расход жидкости измеряется путем взвешивания массы рабочей жидкости до и после эксперимента.

При использовании импульсных сопел происходит значительный разогрев коммутирующего клапана. Для охлаждения был применен медный хомут, надеваемый на импульсное сопло, и медный теплопровод, выводимый из вакуумной части установки и охлаждаемый снаружи.

КОНСТРУКЦИИ ИССЛЕДОВАННЫХ СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУЙНЫХ МИШЕНЕЙ

Статичная жидкостная струя

Для формирования статичной жидкостной струи использовались капилляры очень малого диаметра (~ 5 мкм), на входе в которые создавалось большое давление жидкости, до 25 бар. Мы исследовали возможность использования капилляров различной конструкции для возможности работы в данной схеме.

Первоначально были исследованы инъекционные иглы G33, характеризующиеся большим внутренним диаметром (~ 100 мкм) и, соответственно, большими расходами жидкости ($0.2 \text{ см}^3/\text{с}$). Можно отметить, что получившиеся жидкостные струи весьма стабильны в вакууме. Проводились попытки прокатать либо опрессовать как сами

иглы, так и иглы с напаянными бандажами с целью уменьшения их внутреннего диаметра. Данные попытки оказались безуспешными.

Далее нами был исследован ряд сопел, получаемых по различным технологиям. Так, стеклянные капилляры изготавливались путем расплавления и вытягивания стеклянной трубочки и подпиливания торца шлифмашинкой. Необходимый расход жидкости обеспечивался путем шлифовки торца капилляра. При проведении шлифовки необходимо следить за тем, чтобы плоскость шлифа была перпендикулярна оси капилляра. Технология изготовления таких сопел достаточно простая и может быть реализована в любой лаборатории. Данная технология позволила получить сопла малого диаметра (~5 мкм), расходом ~75 мл/ч (стабильная работа в течение >10 ч наблюдалась при расходах >180 мл/ч). На воздухе данные капилляры работали устойчиво, но струя формируемой жидкости вылетала под наклоном к оси сопла (до 10°). При эксплуатации значительные проблемы вызвал способ крепления стеклянного сопла в обойме. Пайка требует применения специальных стекол и спаев; механическое зажатие при воздействии агрессивных растворителей под большим давлением (~20 бар) не совсем надежно. Стеклянные сопла показали себя ненадежными ввиду хрупкости материала и быстрого разрушения под воздействием лазерного излучения. Случайное попадание сфокусированного лазерного луча практически мгновенно разрушало капилляр, что приводило к залповому выбросу в объем установки большого количества жидкости.

Проводились попытки изготовления фторопластовых капилляров. Изготовление велось путем прокола металлической иглой фторопластового цилиндра. Данные капилляры протекали при повышении давления жидкости на их входе и, соответственно, показали нестабильные расходные характеристики. Также достаточно серьезные проблемы вызвало крепление фторопластового капилляра к системе подачи жидкости. В целом можно констатировать, что фторопластовые сопла оказались непригодны к работе.

Также изготавливались металлические капилляры. Для этого медная капиллярная трубка обжималась на прессе с помощью фигурных пуансонов таким образом, чтобы при деформации металла формировалась коническая полость. Далее проводилось подпиливание капилляра с торца до открытия конической полости. Данная технология позволила получить капилляры малого диаметра (~5 мкм), расходом ~75 мл/ч (стабильная работа >10 ч также при расходах более ~180 мл/ч). На воздухе данные капилляры работали устойчиво. Струя формируемой жидкости вылетала под наклоном к оси капилляра до 10°. Металлические

капилляры легко впаивались в крепежи и показали себя надежными и достаточно удобными в работе. Случайное воздействие лазерного луча не приводило к разрушению капилляра.

Большую проблему при работе всех видов капилляров вызывало наличие твердых включений в рабочей жидкости. Засорение твердыми включениями капилляра приводит к его необратимой порче. На практике эксплуатация таких капилляров возможна только в паре с фильтрами ~1 мкм и с использованием предварительно очищенной жидкости.

Истечение жидкостной струи в вакуум существенно отличается от ее истечения в воздух, а именно: происходит прилипание струи жидкости к торцу сопла. Данное явление существенно и неконтролируемо изменяет направление вылета струи жидкости, вплоть до растекания жидкости по торцу сопла. На практике наблюдается неконтролируемое изменение направления (с периодом до 20 мин) вылета струи жидкости. Явление наблюдается на соплах из таких материалов, как металл, стекло и даже фторопласт. С этим явлением можно бороться, повышая давление на входе в сопло, что, однако, увеличивает расход жидкости. На практике нам не удалось устойчиво устранить данную проблему.

Также при истечении жидкости в вакуум наблюдается ее вскипание и замерзание. Данное явление опасно тем, что при малых расходах жидкость начинать замерзать вокруг среза капилляра, закупоривая отверстие, что делает невозможным повторный пуск капилляра в вакууме. Были предприняты попытки использовать подогреваемые капилляры или нагрев торца капилляра вольфрамовой спиралью. В результате было установлено, что для тщательно подбираемой комбинации “давление жидкости–сечение капилляра–мощность подогревателя” можно получить более-менее устойчивое истечение жидкости.

Оценив весь комплекс проблем, можно отметить, что использование столь тонких капилляров для ЛПИ технически весьма затруднительно и практически неоправданно.

Статичная газовая струя

Для системы формирования статичной газовой струи использовались конические сверхзвуковые сопла малого диаметра (<250 мкм), на входе в которые создается умеренное давление (<5 бар). Данная система позволяет получать газовые и кластерные струи при охлаждении газа на входе в сопло. Малый диаметр сопел и соответственно существенное трение газа о стенки сопла подавляют процесс образования кластеров, поэтому работа в кластерном режиме осуществляется при

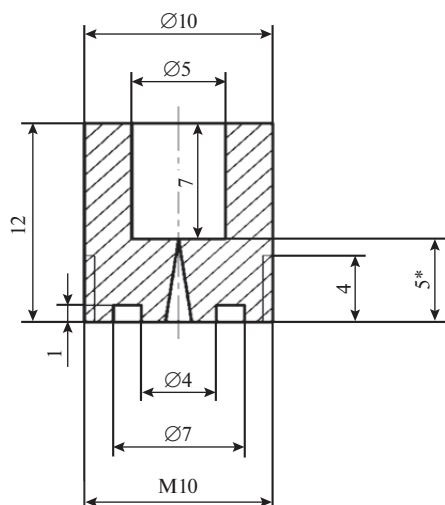


Рис 2. Конструкция конусного сопла с критическим сечением 230 мкм.

охлаждении до температур, весьма близких к температуре конденсации газа при данном давлении.

В нашей работе исследовались конические сверхзвуковые газовые сопла с двумя критическими сечениями: 145 и 230 мкм, длиной 5 мм.

Газовое сопло с критическим сечением 230 мкм изготовлялось сверлением медного цилиндра. Конструкция сопла приведена на рис. 2. На сопле предусмотрена резьба для крепления скиммера и защитная проточка. Сопло впаивалось во фланец CF16, крепившийся к системе подачи газа и системе позиционирования. При изготовлении необходимо учитывать условия работы сопла — при использовании оловянных припоев и мощных систем возбуждения газовой струи (электронный пучок) возможен перегрев и отпайка сопла. Вы-

сверливание сопел осуществлялось специально изготовленными коническими сверлами. Изготавливалась партия сопел, из которой выбирались ~10% сопел, пригодных к эксплуатации. Сложность применения технологии сверления обусловлена уникальностью сопел — их диаметры и качество поверхностей индивидуальны. Нами использовались следующие сопла: критическое сечение 230 мкм, длина 5 мм, угол раствора 9°. В случае засорения сопла хорошо прочищались механически. Сопло с критическим сечением 230 мкм оказалось надежным в работе, но показало полную непригодность при работе с откачными системами малой производительности.

Газовое сопло с критическим сечением 145 мкм изготовлялось электрохимическим осаждением меди на алюминиевую конусную форму до образования медного цилиндра с алюминиевым конусом внутри. Далее проводилось растворение алюминия и запрессовка получившегося медного цилиндра с конусным каналом в корпус сопла. Корпус сопла в свою очередь впаивался во фланец CF16, крепившийся к системе подачи газа и к системе позиционирования. Конструкция сопла приведена на рис. 3. На корпусе сопла нарезана резьба для крепления скиммера и проведения юстировочных работ.

Данная технология изготовления сопел обеспечивает удовлетворительную серийность изготовления и достаточно проста для освоения в рамках отдельно взятой лаборатории. Недостатком технологии является длительность процесса осаждения меди (~1–2 месяца) и повышенная шероховатость стенок сопла. В случае засорения данные сопла удовлетворительно прочищаются механически, но возможно их повреждение. Более предпочтительна продувка сопел в обратную

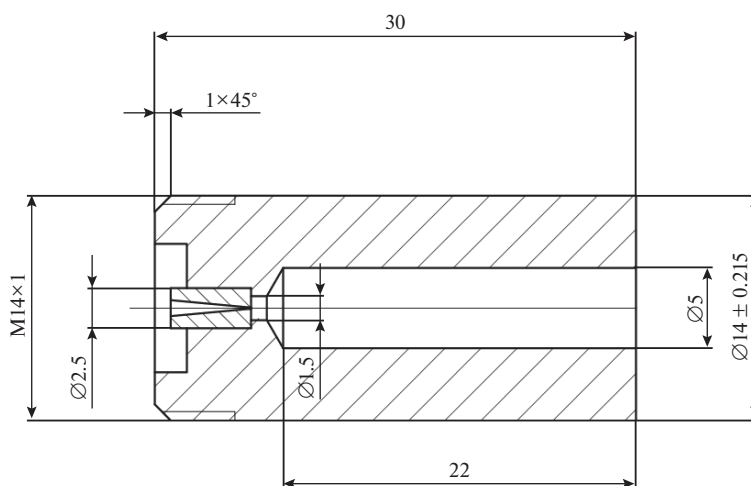


Рис 3. Конструкция конусного сопла с критическим сечением 145 мкм.

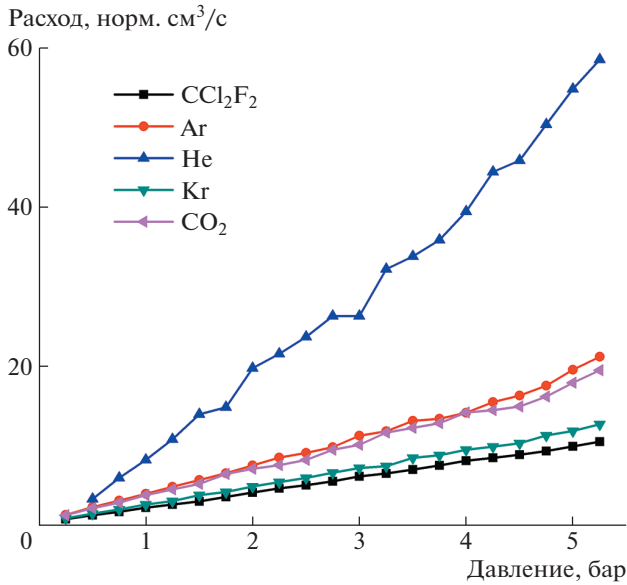


Рис. 4. Расход различных газов при истечении в вакуум из конусного сопла с критическим сечением 145 мкм.

сторону сжатым газом. Данное сопло показало надежность в работе, но ограниченную пригодность (работа только при малом давлении) при работе с откачными системами малой производительности.

Расходные характеристики при использовании различных газов для конического сопла с критическим сечением 145 мкм, длиной 5 мм и углом раствора 10° приведены на рис. 4. Температура газа составляла 300 К, давление приведено в абсолютных единицах. Использование таких сопел позволяет охлаждать газ и работать в кластерном режиме; при охлаждении до ~ 150 К расход газов возрастает на $\sim 20\%$.

Был проведен расчет параметров газа при истечении криптона из конического сопла с критическим сечением 145 мкм, длиной 5 мм и углом раствора 10° в вакуум без учета конденсации при температуре 300 К для давления 5 бар. Расчет проводился для вязкого теплопроводящего сжимаемого газа в соответствии с математической моделью, изложенной в [15]. Результаты расчетов поля температур и концентраций атомов криптона приведены соответственно на рис. 5 и 6. Ось X совпадает с осью сопла, координата R соответствует удалению от оси струи.

Согласно рис. 5, 6, в зоне формирования лазерной искры, расположенной на расстоянии ~ 0.5 мм от среза сопла, концентрации частиц достигают $\sim 10 \cdot 10^{18}$ штук/см³ при температуре струи ~ 60 К. При указанных концентрациях частиц и температурах газа может наблюдаться гомогенная конденсация, но на расстоянии ~ 0.5 мм от среза сопла; это практически не влияет на газодинамические параметры струи.

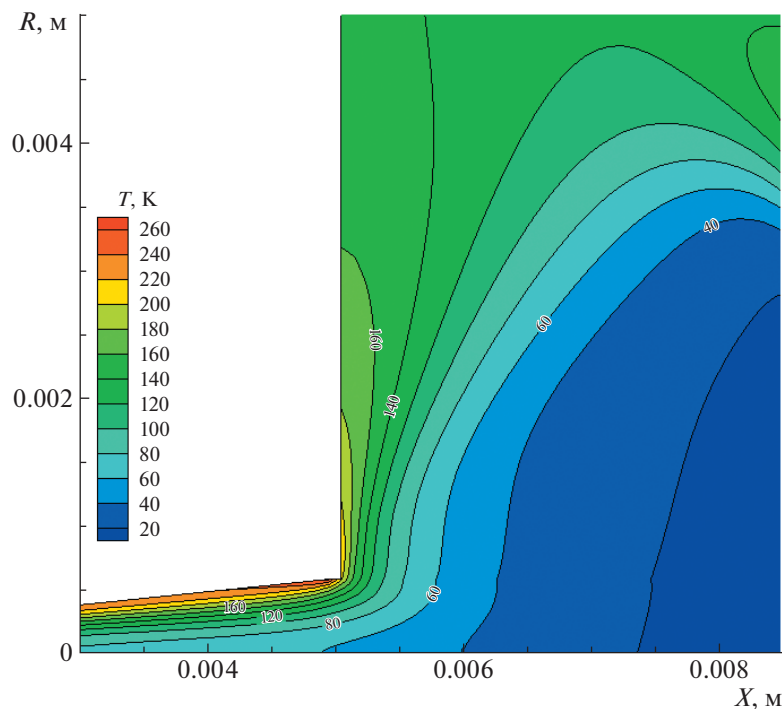


Рис. 5. Поле температур при истечении струи криптона при параметрах газа на входе в сопло $T_0 = 300$ К, $p_0 = 5$ бар из конического сопла в вакуум.

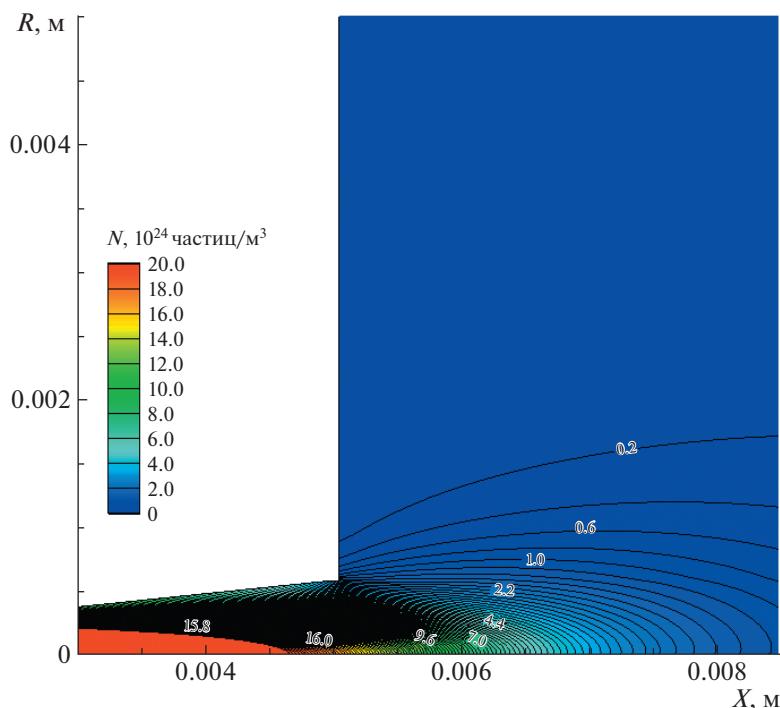


Рис. 6. Поле концентраций при истечении струи криптона при параметрах газа на входе в сопло $T_0 = 300$ К, $p_0 = 5$ бар из конического сопла в вакуум.

Такие сопла часто используют для создания кластерных пучков за счет конденсации газовой струи при ее истечении в вакуумный объем. Средний размер кластеров, образующихся в таких струях, а также некоторые другие параметры исследовались во многих работах, например [16–18].

Данная система формирования газовых струй сравнительно сложна в изготовлении, но достаточно надежна в работе, она может быть рекомендована для использования в системах с высокой частотой возбуждающих импульсов либо для формирования кластерных пучков.

Импульсная жидкостная и микрокапельная струи

Для системы формирования импульсной жидкостной струи использовался быстродействующий клапан, на вход которого подавалась жидкость под небольшим давлением (~5 бар), а на выходе закреплена перегородка с отверстием среднего диаметра (225 мкм) либо капилляр.

Капельно-жидкостные струи, формируемые в процессе истечения из жидкости через отверстие (капилляр) в вакуум, в общем случае имеют сложную пространственную структуру, определяемую термодинамическими свойствами и параметрами подаваемой жидкости. Отдельно стоит отметить, что параметры жидкостной струи также существенно изменяются при истечении струи в ваку-

ум с различным остаточным давлением. В процессе истечения одновременно происходит ряд процессов, таких как дробление жидкостной струи, вскипание жидкости в вакууме и ее замерзание. Расчет структуры такой струи весьма трудоемок и не проводился. В случае необходимости проведения подобных расчетов можно обратиться к литературе, посвященной конструированию автомобильных форсунок. Тем не менее, можно утверждать, что при истечении струи жидкости из отверстия в перегородке в зоне формирования лазерной искры присутствуют капли (кристаллы) жидкости плотностью порядка $\sim 10^{24}$ молекул/см³. В случае истечения струи из капилляров различного диаметра и длины можно получить различные жидкостные струи, вплоть до непрерывных.

В качестве клапана для жидкости с профилированным выходным отверстием нами была использована форсунка Bosch 0 280 158 017, имеющая 4 выходных отверстия диаметром 225 мкм. Схематически конструкция форсунки изображена на рис. 7. Управление форсункой осуществлялось импульсным питанием напряжением 300 В (рабочее 12 В). При этом были определены следующие параметры работы форсунки:

- время открытия форсунки ~ 100 мкс;
- рабочее давление до 25 бар;
- минимальная рабочая температура $> -20^\circ\text{C}$;

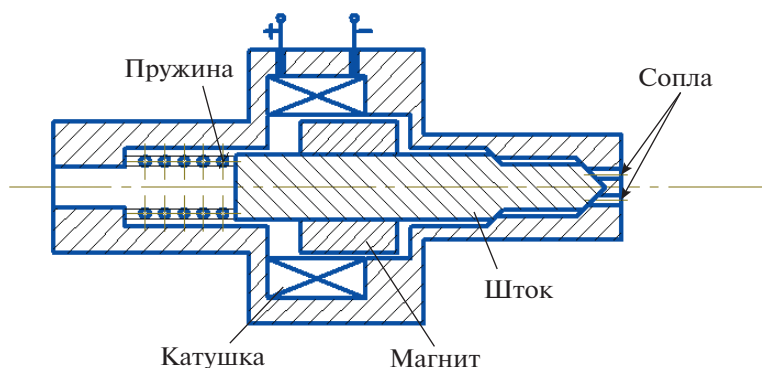


Рис. 7. Схематическая конструкция форсунки Bosch 0 280 158 017.

— в номинальном режиме работы при истечении струи газа в вакуум температура форсунки составляет $\sim 55^{\circ}\text{C}$, а при истечении струи жидкости в вакуум $\sim 75^{\circ}\text{C}$.

Для формирования струи жидкости использовалось одно из отверстий в самой форсунке, три других отверстия запаивались оловянным припоем. Для измерения расходов жидкости использовалась дистиллированная вода, частота срабатывания форсунки 10 Гц. Расходные характеристики форсунки приведены на рис. 8.

Для различных жидкостей при давлении 4 бар на входе в форсунку, температуре 300 К, частоте 10 Гц и получены следующие расходы:

— для воды при времени открытия форсунки 0.9 мс расход составил 65 мл/ч;

— для изопропилового спирта при времени открытия форсунки 0.9 мс расход — 71 мл/ч;

— для гексана при времени открытия форсунки 0.6 мс расход — 58 мл/ч;

— для дихлорметана при времени открытия форсунки 0.5 мс расход — 51 мл/ч.

Расход жидкостей в течение длительного времени оставался постоянным. Изменений расхода с периодичностью 10–20 мин, столь характерных для постоянных жидкостных струй, не наблюдалось. В закрытом состоянии данные клапаны являются газоплотными, натекание в установку в течение суток практически отсутствует.

В случае использования протяженных капилляров последние припаиваются к торцу форсунки. При необходимости использования отверстия другого диаметра все отверстия форсунки запаиваются, и методом электроэрозии в лобовой детали форсунки прорезается новое отверстие необходимого диаметра.

Данная система формирования импульсной жидкостной и микрокапельной струй легко изготавливается, весьма надежна в работе и может быть рекомендована к применению в лабораторной технике.

Импульсная газовая и кластерная струи

Для системы формирования импульсной газовой струи использовался импульсный клапан, на входе в который создавалось большое давление газа (~ 25 бар), а на выходе закреплялись конические сопла большого критического сечения (~ 500 мкм). При таких давлениях газа на входе в сопло наблюдается развитая конденсация, что открывает возможность получения кластеров различного размера.

В качестве клапана для газа нами была также использована форсунка Bosch 0 280 158 017. В торце форсунки электроэрозионным методом прорезалось отверстие диаметром 1 мм. На поверх-

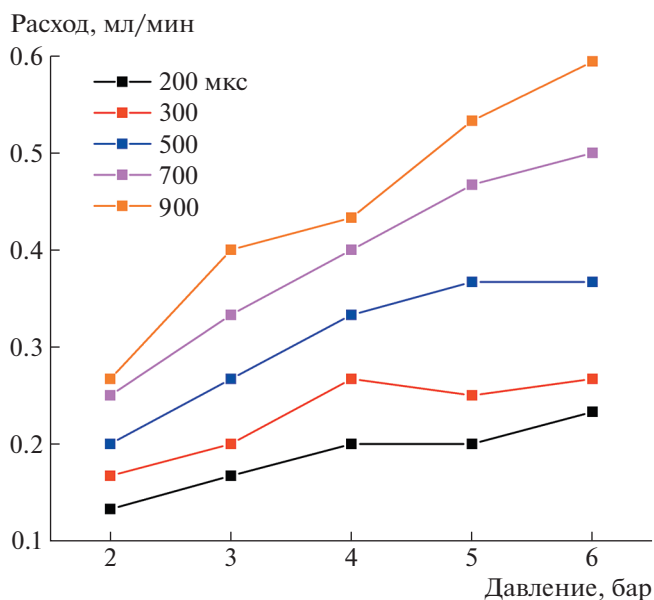


Рис. 8. Расход воды через форсунку Bosch 0 280 158 017 в зависимости от давления при разных временах открытия форсунки.

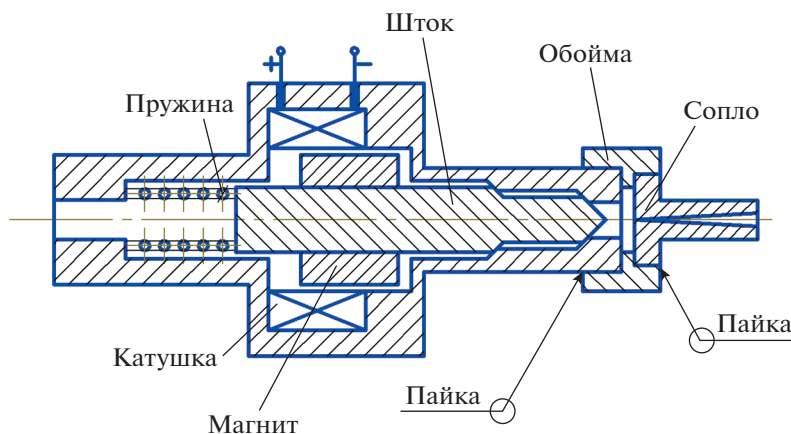


Рис. 9. Конструкция системы формирования импульсной газовой струи.

ность форсунки припаивалась обойма, к которой в свою очередь припаивалось сопло. Для измерения расходов использовалось коническое сверхзвуковое сопло с критическим сечением 450 мкм, длиной 5 мм, углом раствора 11°. Конструкция данной системы приведена на рис. 9.

Нами исследовались расходы углекислоты через систему формирования импульсной газовой струи. Результаты измерений расхода CO_2 при комнатной температуре в зависимости от давления при разном времени открытия форсунки приведены на рис. 10. Видно, что полученные зависимости практически линейные. При больших давлениях, до 25 бар, расход газа через форсунку не измерялся. Дополнительно проводилась откачка установки одним турбомолекулярным насосом производительностью 1000 л/с для некоторых газов (CO_2 , CHF_3 , Kr) при давлениях газов на входе в сопло до 25 бар. Уровень остаточного давления в камере при данных экспериментах составлял $\sim 10^{-2}$ Па.

В закрытом состоянии данные клапаны демонстрируют весьма большую газоплотность, натекание в установку в течение суток практически отсутствует.

Был проведен расчет параметров газа при истечении криптона из конического сопла с критическим сечением 500 мкм, длиной 5 мм и углом раствора 8° в вакуум с учетом конденсации при температуре 300 К для давления 25 бар. Расчет проводился в соответствии с математической моделью, изложенной в [15]. Результаты расчетов поля температур и концентраций атомов криптона приведены на рис. 11 и 12. Ось X совпадает с осью сопла, координата R соответствует удалению от оси струи.

Согласно рис. 11, 12, в зоне формирования лазерной искры, на расстоянии ~ 0.5 мм от среза

сопла, наблюдается концентрация частиц $\sim 5.0 \times 10^{19}$ штук/см³ при температуре ~ 80 К. При указанных выше параметрах газа на входе в сопло будет наблюдаться развитая конденсация, которая приводит к локальному повышению температуры на выходе из сопла и существенно изменяет газодинамические параметры струи. Однако эффект от конденсации на данный момент недостаточно исследован, и, таким образом, данный расчет может использоваться исключительно как ориентировочный.

Описанная система формирования импульсной газовой струи легко изготавливается, весьма надежна в работе и может быть рекомендована к применению в лабораторной технике.

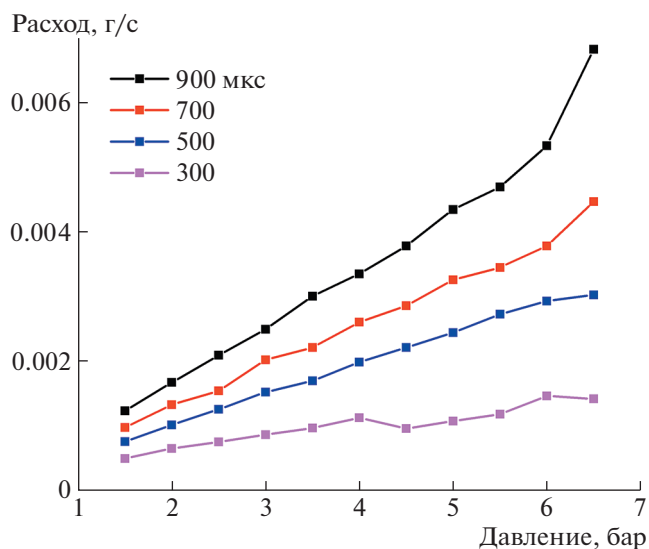


Рис. 10. Расход CO_2 через систему напуска высокого давления в зависимости от давления при различной длительности открытия форсунки.

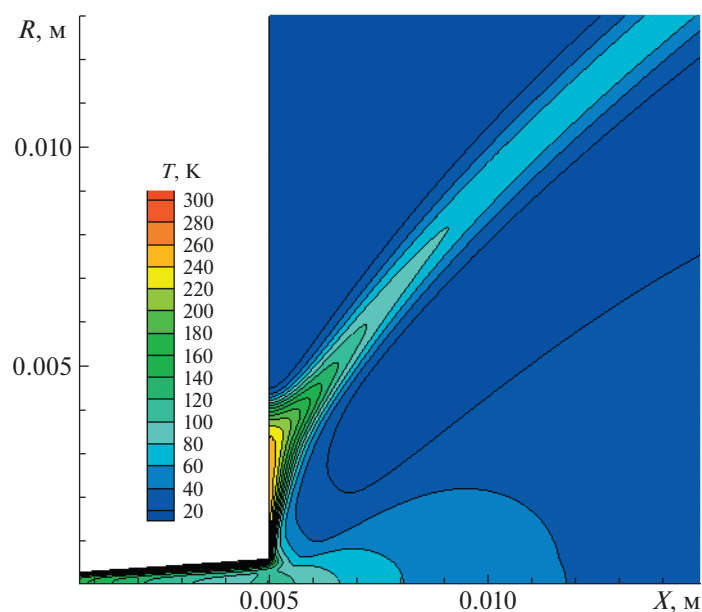


Рис. 11. Поле температур при истечении струи криптона при параметрах газа на входе в сопло $T_0 = 300$ К, $p_0 = 25$ бар из конического сопла в вакуум.

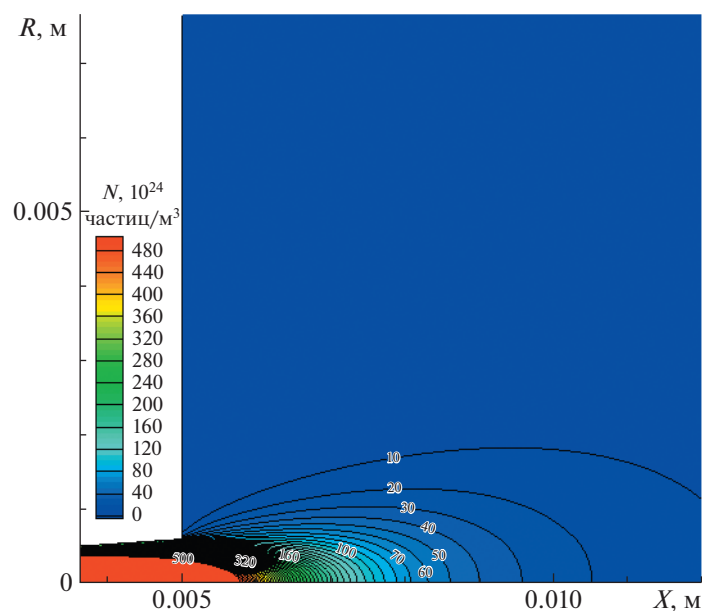


Рис. 12. Поле концентраций частиц при истечении струи криптона при параметрах газа на входе в сопло $T_0 = 300$ К, $p_0 = 25$ бар из конического сопла в вакуум.

ВЫВОДЫ

Разработаны, изготовлены и испытаны различные системы формирования газовых и жидкостных струй малого расхода для применения в ЛПИ. Проведены исследования расходов предложенных систем формирования мишени и изучены особенности различных систем.

Для применения в лабораторной практике можно рекомендовать использование импульсных жидкостных и газовых систем как наиболее простых, технологичных и удобных. В случае использования ЛПИ с непрерывной лазерной накачкой либо при возбуждении пучками частиц возможно применение источников непрерывной газовой струи с использованием сопел с малым критическим сечени-

ем, однако изготовление данных сопел достаточно трудоемко. Использование источников с непрерывной жидкостной струей практически невозможно.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1361).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абраменко Д.Б., Анциферов П.С., Астахов Д.И., Виноходов А.Ю., Вичев И.Ю., Гаязов Р.Р., Якушкин А.А.* // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 3. С. 323. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038447>
2. *Berglund M., Rymell L., Hertz H.M., Wilhein T.* // Review of Scientific Instruments. 1998. V. 69. P. 2361. <https://doi.org/10.1063/1.1148944>
3. *Wieland M., Wilhein T., Faubel M., Ellert C., Schmidt M., Sublemontier O.* // Applied Physics B. 2001. V. 72. P. 591. <https://doi.org/10.1007/s003400100542>
4. *De Groot J., Hemberg O., Holmberg A., Hertz H.M.* // Journal of Applied Physics. 2003. V. 94. P. 3717. <https://doi.org/10.1063/1.1602571>
5. *Malmqvist L., Rymell L., Berglund M., Hertz H.M.* // Review of Scientific Instruments. 1996. V. 12. P. 4150. <https://doi.org/10.1063/1.1147561>
6. *Düsterer S., Schwoerer H., Ziegler W., Ziener C., Sauerbrey R.* // Applied Physics B. 2001. V. 73. P. 693. <https://doi.org/10.1007/s003400100730>
7. *Нечай А.Н., Перекалов А.А., Чхало Н.И., Салащенко Н.Н.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 19. С. 14. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.19.48310.17862>
8. *Hansson B.A.M., Hertz H.M.* // Journal of Physics D: Applied Physics. 2004. V. 37. № 23. P. 3233. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/23/004>
9. *Hansson B.A., Hemberg O., Hertz H.M., Berglund M., Choi H.J., Jacobsson B., Wilner M.* // Review of Scientific Instruments. 2004. V. 75. № 6. P. 2122. <https://doi.org/10.1063/1.1755441>
10. *Fogelqvist E., Kördel M., Selin M., Hertz H.M.* // Journal of Applied Physics. 2015. V. 118. № 17. P. 174902. <https://doi.org/10.1063/1.4935143>
11. *Holburg J., Müller M., Mann K., Wieneke S.* // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2019. V 37. № 3. P. 031303. <https://doi.org/10.1116/1.5089201>
12. *Fiedorowicz H., Bartnik A., Szczurek M., Daido H., Sakaya N., Kmetik V., Wilhein T.* // Optics Communications. 1999. V. 163. № 1–3. P. 103. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00100-5](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00100-5)
13. *Гарбарук А.В., Демидов Д.А., Калмыков С.Г., Сасин М.Э.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 6. С. 20.
14. *Нечай А.Н., Перекалов А.А., Чхало Н.И., Салащенко Н.Н., Забродин И.Г., Каськов И.А., Пестов А.Е.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 9. С. 83. <https://doi.org/10.1134/S0207352819090099>
15. *Koroleva M.R., Mitrakova E.A., Korepanov M.A.* // Journal of Physics: Conference Series. VI All-Russian Conference “Thermophysics and Physical Hydrodynamics” and the School for Young Scientists “Thermal Physics and Physical Hydrodynamics: Modern Challenges”. 2021. P. 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012016>
16. *Ramos A., Fernández J.M., Tejada G., Montero S.* // Phys. Rev. A. V. 72. № 5. P. 053204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.053204>
17. *Hagena O.F.* // Surface Science. 1981. V. 106. № 1. P. 101.
18. *Hagena O.F., Obert W.* // The journal of Chemical physics. 1972. V. 56. № 5. P. 1793. <https://doi.org/10.1063/1.1677455>