

УДК 621.384.644  
EDN: QIBDXX

PACS: 07.77.Ka

**Вакуумная система лазерного источника ионов дейтерия,  
азота и кислорода для линейного ускорителя***В. Н. Пашенцев, Е. В. Пашенцева*

*Лазерный ионный источник является универсальным плазменным источником для получения широкого спектра многозарядных ионов. Для получения ионов газа применяются мишени, химический состав которых содержит атомы газа. В результате испарения мишени сфокусированным лазерным лучом происходит скачок давления в вакуумной камере. Давление атомов газа зависит от массы испаренного вещества, частоты повторения лазерных импульсов, химического состава мишеней, объема вакуумной камеры, скорости откачки насоса. Приведены оценки давлений в вакуумной камере в одиночном и в периодическом режимах работы лазера с частотой 1–10 Гц для плотности мощности  $10^{11}$ – $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. При работе лазера с частотой 1 Гц давление в вакуумной камере находится на уровне остаточного давления в вакуумной камере  $2 \times 10^{-6}$  Па. С увеличением частоты происходит рост минимального давления, так как вакуумный насос не успевает производить откачивание атомов газа до следующего лазерного импульса. При частоте 10 Гц минимальное давление в вакуумной камере увеличивается на несколько порядков. Приведена схема вакуумной системы лазерного ионного источника на основе турбомолекулярных насосов со скоростью откачки 700 л/с.*

*Ключевые слова:* лазерный ионный источник, дейтерий, кислород, азот, лазер, частота импульсов, давление, вакуумная камера.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-71-80

**Введение**

Лазерная плазма, образующаяся при фокусировке импульсного лазерного излучения на мишени, широко используется в научно-

исследовательских и технологических установках. В ускорительной технике лазерные ионные источники (ЛИС) применяются для получения многозарядных ионных пучков [1–3]. Из-за высокой электронной температуры лазерной плазмы образуются многозарядные ионы вплоть до ядер легких элементов. В зависимости от химического состава мишени, которая испаряется под действием лазерного излучения, генерируются ионные пучки от ионов водорода до ионов тяжелых металлов. Лазерные источники ионов дейтерия и лития применяются в нейтронных генераторах [4]. В масс-спектрометрии ЛИС является универсальным источником для исследования химического состава различных веществ [5, 6]. Импульсное лазерное осаждение тонких пленок в вакууме применяется для получения оптических и функциональных покрытий, ко-

**Пашенцев Владимир Николаевич**<sup>1</sup>, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: pashentsev2001@mail.ru

**Пашенцева Елена Владимировна**<sup>2</sup>, студентка.

E-mail: pashentceva.ev20@physics.msu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ.

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, ул. Ленинские Горы, 1.

Поступила в редакцию 13.01.2023

После доработки 22.01.2023

Принята к публикации 30.01.2023

торые можно напылять на подложки из различных материалов: на металлы, полупроводники, керамику, полимеры, биологические материалы [7]. Импульсная лазерная плазма также является источником излучения в терагерцовом диапазоне.

При падении мощного сфокусированного лазерного излучения на мишень происходит интенсивное испарение мишени, минуя жидкую фазу, с образованием кратера на ее поверхности. В результате значительного увеличения температуры и интенсивной ионизации пара формируется плазменный факел, направленный от мишени перпендикулярно ее поверхности [8]. Так как лазерное излучение имеет короткую длительность и высокую плотность мощности, то энергия излучения тратится на испарение материала мишени, нагрев и интенсивную ионизацию пара непосредственно у поверхности мишени. Для получения многозарядных ионов металлов используются металлические мишени, после испарения которых остаточный вакуум в ЛИС незначительно ухудшается, так как испаренные атомы осаждаются на стенки вакуумной камеры. Если в состав химического соединения материала мишени входят атомы газа (водород, дейтерий, кислород, азот, фтор), то после испарения мишени будет происходить рост давления в вакуумной камере. В этом случае необходимо откачивание камеры вакуумным насосом с высокой производительностью, чтобы при следующем лазерном импульсе ослабить рассеяние лазерной плазмы и ионного пучка на атомах газа, оставшихся в вакуумной камере после предыдущего испарения мишени. Среднее давление в вакуумной

камере при увеличении частоты лазерных импульсов будет увеличиваться и его значение может на несколько порядков превышать остаточное давление, которое было до начала работы лазера. Целью работы является оценка давления в вакуумной камере ионного источника при лазерном испарении материала мишени для различных частот следования лазерных импульсов.

### Лазерный ионный источник линейного ускорителя

Лазерный источник ионного пучка (рис. 1) состоит из вакуумной камеры 1 и вакуумной камеры 2, соединенных трубопроводом 3 для транспортировки потока лазерной плазмы 4 от мишени 5, которая испаряется под действием сфокусированного излучения лазера 6. Если в вакуумной камере 1 напротив лазерной мишени будет установлена подложка для нанесения тонких пленок, то на нее будет осаждаться материал мишени [7]. Для формирования ионного пучка 7 плазменный поток из вакуумной камеры 1 выводится в вакуумную камеру 2 через длинный трубопровод, который может быть помещен внутрь магнитной катушки, служащей для эффективной транспортировки лазерной плазмы [9]. В вакуумной камере 2 происходит извлечение и ускорение ионов в зазоре между электродами с электрическим полем между ними. Чтобы исключить пробой высокого напряжения в вакуумной камере 2, в ней должно быть низкое давление около  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  Па. Вакуумная система ЛИС не должна создавать значительной газовой нагрузки для линейного ускорителя многозарядных ионов.

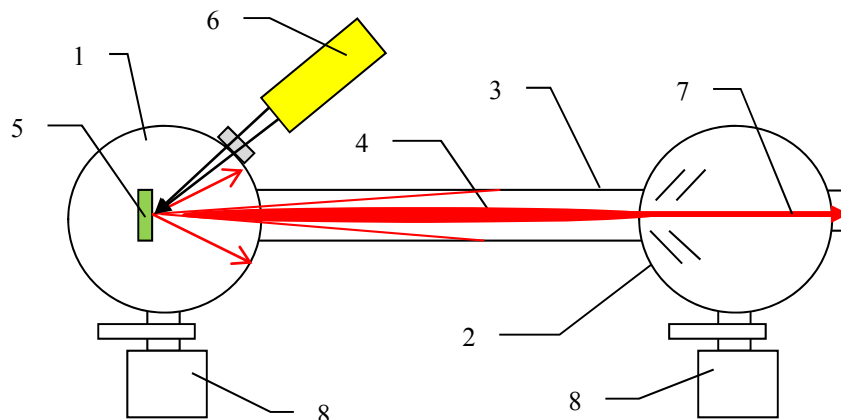


Рис. 1. Схема ЛИС: 1 – вакуумная камера 1; 2 – вакуумная камера 2; 3 – вакуумный трубопровод; 4 – лазерная плазма; 5 – мишень; 6 – лазер; 7 – ионный пучок; 8 – турбомолекулярные насосы

В результате фокусировки мощного лазерного излучения на мишени образуется плазма с высокой плотностью, которая препятствует прохождению лазерного излучения через нее к поверхности мишени. Экранирование лазерного излучения приводит к нагреву плазмы до высокой температуры. В результате интенсивной электронной ионизации в плазме образуются многозарядные ионы. Так как плазма с высокой плотностью и температурой экранирует лазерное излучение около поверхности мишени, то энергия лазерного излучения в основном расходуется на ионизацию испаренных атомов, а количество испаренного вещества мишени изменяется незначительно для различных материалов. Плазменный факел из вакуумной камеры 1 внутри трубопровода распространяется к вакуумной камере 2. В ней происходит ускорение ионного пучка до энергии в десятки килоэлектронвольт. В результате пучок многозарядных ионов на выходе ЛИС имеет малую угловую расходимость. Лазерное испарение мишеней различного химического состава дает возможность получать ионы большого количества химических элементов.

Оценка давлений в вакуумных камерах ЛИС включает два этапа: вначале оценивается скачок давления атомов газа в вакуумной камере 1 после испарения материала мишени, затем давление в вакуумной камере 2, в кото-

рую поступает часть атомов газа из вакуумной камеры 1.

### Мишени лазерного ионного источника

Для осаждения пленок различного химического состава на подложку в вакуумной камере 1 или для получения пучков многозарядных ионов при выводе плазменного факела в вакуумную камеру 2 могут быть использованы мишени, которые широко применяются в технологических вакуумных установках магнетронного напыления. В табл. 1 приведен химический состав различных материалов, которые могут быть использованы для получения пучков ионов газа с различными зарядами. В таблице также даны атомы газа в ионном пучке, которые через отверстие для вывода пучка будут выходить из ЛИС в линейный ускоритель, создавая газовую нагрузку для его вакуумной системы. Для получения атомов металлов и неметаллов предпочтительно использовать мишени из химически чистых материалов или химические соединения, в состав которых не входят атомы газа, чтобы давление в вакуумной камере не увеличивалось при лазерном испарении мишени. Таким образом, для получения ионов бора мишень  $B_4C$  предпочтительнее по сравнению с мишенями  $BN$  или  $BF_3$ , так как эти соединения содержат атомы газа.

Таблица 1

Химический состав мишеней ЛИС

Ионы	Мишень	Атомы газа в ионном пучке	Осажденные атомы
$D^{2+}$	LiD TiD <sub>2</sub>	Дейтерий Дейтерий	Li Ti
$Li^{2+}$ $Li^{3+}$	LiTiO LiTaO Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Кислород Кислород Кислород	Ti, Li Ta, Li C, Li
$B^{3+}$	B <sub>4</sub> C BN BF <sub>3</sub>	– Азот Фтор	C, B B B
$N^{5+}$	BN Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> TiN	Азот Азот Азот	B Si Ti
$O^{5+}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiO <sub>2</sub>	Кислород Кислород	Al Ti
$F^{5+}$	LiF	Фтор	Li

Если мишень будет состоять из оксидов или нитридов металлов, то из вакуумной камеры 1 в трубопровод будут поступать атомы и ионы газа (кислорода, азота), а также ионы металлов. Испаренные атомы металлов (см. табл. 1) останутся внутри вакуумной камеры, осажаясь на ее стенки. Для получения пучка ионов газа с одинаковым зарядом используется поворотный магнит между ЛИС и линейным ускорителем.

Пластина мишени, на которой фокусируется лазерный луч, должна перемещаться на небольшой шаг в горизонтальном и вертикальном направлении. В результате многократного испарения материала на ее поверхности остается небольшой кратер, который может влиять на форму плазменного факела и однородность ионного пучка. После сканирования всей площади мишени требуется ее замена. Кроме того, возможно вращение мишени в виде диска или трубки.

### Остаточное давление в вакуумной камере

Для оценки остаточного давления выберем вакуумную камеру 1 сферической формы диаметром 0,5 м с вакуумным окном ввода лазерного излучения. Соответственно объем вакуумной камеры составляет  $V = 0,065 \text{ м}^3$ , площадь внутренней поверхности  $A = 0,785 \text{ м}^2$ . На камере установлен затвор с отверстием ДУ160 мм и турбомолекулярный насос со скоростью откачки  $S_0 = 700 \text{ л/с}$ .

Оценим эффективную скорость откачки насоса  $S = US_0 / (U + S_0)$ , используя суммарную проводимость  $U = U_1 U_2 / (U_1 + U_2)$  трубопровода длиной  $L$  и диаметром  $d$ , где  $U_1$  – проводимость отверстия;  $U_2$  – проводимость трубопровода,

$$U_1 = \frac{36,4\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{T_0}{\mu}}$$

$$U_2 = \frac{38,1d^3}{L} \sqrt{\frac{T_0}{\mu}}$$

где  $T_0$  – температура газа;  $\mu$  – молярная масса газа.

Трубопровод длиной 16 см (с учетом толщины затвора) имеет проводимость

1330 л/с, а эффективная скорость откачки турбомолекулярного насоса составляет  $S = 460 \text{ л/с}$ . Когда лазерный источник выключен, основным источником натекания газа в вакуумную камеру являются газовыделение со стенок и натекание газа через вакуумные вводы и окна. Газовый поток со стенок вакуумной камеры зависит от многих факторов: технологии механической обработки поверхности, материала стенок, загрязнений поверхности, обезгаживания поверхности стенок с помощью ее предварительного прогрева [10]. Для оценки будем предполагать, что после длительной откачки удельный поток газа с внутренних стенок вакуумной камеры, выполненной из нержавеющей стали, составляет  $q = 10^{-5} \text{ мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ . Остаточное давление в вакуумной камере  $P_{11} = qA/S$  оценивается значением  $2 \times 10^{-6} \text{ Па}$ .

### Давление в вакуумной камере в режиме одиночных лазерных импульсов

В результате лазерной абляции мишени происходит ионизация испаренного вещества. Для оценки скачка давления в вакуумной камере 1, будем предполагать, что из-за малой площади отверстия трубопровода через него выйдет незначительное количество испаренного вещества. Все испаренные атомы останутся внутри вакуумной камеры. Выделившийся из мишени газ будет откачиваться вакуумным турбомолекулярным насосом. Масса испаренного вещества за один импульс лазера оценивается значением  $m = 10^{-6} \text{ г}$  при плотности мощности лазерного излучения на мишени  $10^{11} - 10^{12} \text{ Вт/см}^2$  [6, 11].

Лазер будет работать в режиме одиночных импульсов, когда за время между импульсами вакуумная камера будет успевать откачиваться практически до остаточного давления. Тогда в результате испарения мишени в объеме вакуумной камеры будет  $N = N_A m / \mu$  молекул, где  $N_A$  – число Авогадро. Мишень может состоять из соединений, в состав которых входят атомы нескольких химических элементов. Количество ионов зависит также от того, с каким коэффициентом химический элемент входит в формулу. Для молекулы LiTiO число  $N$  атомов лития, титана и кислорода будет одинаковым. Оно будет рав-

но числу испаренных молекул. Для соединения  $B_4C$  количество атомов бора будет  $4N$ . Скачок давления в вакуумной камере 1 оценивается  $P = RT_0 m / \mu V$ , где  $R$  – универсальная газовая постоянная. В табл. 2 приведено давле-

ние атомов газа  $P$  после абляции одинаковой массы мишени в предположении, что после многократных столкновений атомов газа, средняя температура газа будет равна 300 К.

Таблица 2

Давление атомов газа при использовании мишеней с различным химическим составом

Состав мишени	LiD	TiD <sub>2</sub>	LiTiO	TiN	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Атом газа	D	D	O	N	O	O
$P$ , Па	$4,3 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-3}$

Из табл. 2 видно, что при испарении мишеней на основе соединений титана давление в вакуумной камере увеличится до значения около  $P = 10^{-3}$  Па, что на три порядка превосходит остаточное давление. Для откачки газа до уровня остаточного давления потребуется интервал времени  $t = \tau \ln (P/P_{11})$ . Оценки показывают, что откачивание газа до десятой доли остаточного давления  $P = 0,1P_{11}$  происходит за  $t = 1,2$  с. Таким образом, при работе лазера с периодом в несколько секунд ЛИС будет работать в режиме одиночных импульсов, так как практически весь газ после испарения мишени, будет откачен вакуумным насосом до уровня остаточного давления.

### Давление в вакуумной камере при работе лазера в частотном режиме

В режиме периодических импульсов с частотой 1–10 Гц вакуумный насос не всегда будет успевать откачивать атомы газа между лазерными импульсами до первоначального давления. В процессе вакуумной откачки дав-

ление  $P_1(T)$  уменьшается по экспоненциальной зависимости

$$P_1(T)/P = \exp(-T/\tau)$$

где  $P_1(T)$  – давление в вакуумной камере перед следующим лазерным импульсом;  $P$  – начальное давление;  $T$  – период импульсов;  $\tau$  – постоянная времени откачки газа вакуумным насосом.

Для приведенных размеров вакуумной камеры постоянная времени откачки  $\tau = V/S$  составляет  $\tau = 0,14$  с. Если период следования лазерных импульсов будет одного порядка с постоянной времени откачки  $\tau$ , то давление к следующему лазерному импульсу уменьшится только в несколько раз.

Общее давление в вакуумной камере равно сумме импульсного скачка давления и давления газа, оставшегося после предыдущего импульса. Оно будет постепенно увеличиваться после каждого лазерного импульса до тех пор, пока не установится стационарный режим (рис. 3).

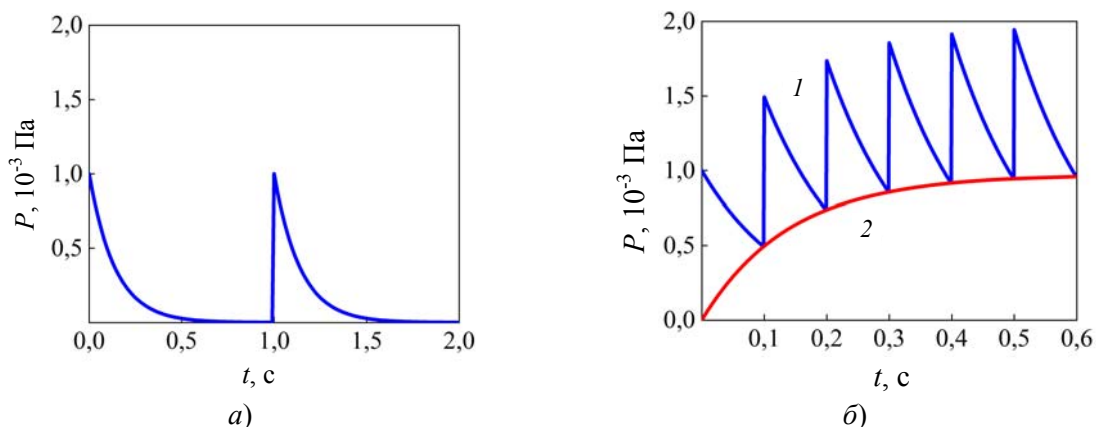


Рис. 3. Импульсное давление в вакуумной камере в частотном режиме работы лазера. а) – частота 1 Гц; б) – частота 10 Гц; 1 – импульсное давление атомов газа; 2 – минимальное давление в вакуумной камере

В оценках минимального давления  $P_0$  не будет учитываться первоначальное остаточное давление вакуумной камере  $P_{11}$ , так как оно значительно меньше давления испаренных атомов газа. Если скачок давления после первого лазерного импульса равен  $P$ , то через период  $T$  смещение давления  $P_{01}$  перед началом следующего лазерного импульса будет равно  $P_{01} = P \exp(-T/\tau) = Pk$ , где  $k = \exp(-T/\tau)$ . После каждого следующего лазерного импульса смещение давления равно сумме импульсного давления  $P$  и давления атомов газа, которое осталось после предыдущего импульса:

$$\begin{aligned} P_{02} &= (P + P_{01})k = P(1+k)k, \\ P_{03} &= (P + P_{02})k = Pk + P(1+k)k^2, \\ P_{04} &= (P + P_{03})k = Pk + Pk^2 + P(1+k)k^3, \\ P_{05} &= (P + P_{04})k = Pk + Pk^2 + Pk^3 + P(1+k)k^4, \\ P_{0n} &= (P + P_{0n-1})k = P(k + k^2 + k^3 \dots k^{n-2} + (1+k)k^{n-1}). \end{aligned}$$

Слагаемые  $P_{0n}$  являются убывающей геометрической прогрессией со знаменателем  $k$ , сумма которой при  $n \rightarrow \infty$  равна

$$P_0 = \frac{Pa}{1-a} = \frac{P}{\exp(T/\tau) - 1}.$$

Минимальное давление газа  $P_0$  зависит от скачка давления  $P$ , частоты импульсов, объема вакуумной камеры  $V$  и скорости откачки насоса  $S$  ( $\tau = V/S$ ). Объем вакуумной камеры также влияет на скачок давления испаренных атомов газа. Из рис. 3б видно, что при частоте 10 Гц минимальное давление  $P_0$  в вакуумной камере 1 достаточно быстро выходит на стационарный режим в течение одной секунды через несколько лазерных импульсов.

В табл. 3 дана оценка минимального давления  $P_0$  по отношению к скачку давления газа  $P$  и абсолютное значение давление в вакуумной камере 1 при испарении титановых мишеней, когда импульсное давление атомов газа оценивается значением  $P = 10^{-3}$  Па. Давление в вакуумной камере увеличивается от минимального давления  $P_0$  до максимального давления в момент испарения мишени ( $P_0 + P$ ).

Таким образом, в вакуумной камере лазерного источника импульсные скачки давле-

ния газа относительно минимального уровня  $P_0$  значительно зависят от частоты следования импульсов. На частоте 1 Гц минимальное давление в вакуумной камере будет на уровне остаточного давления  $2 \times 10^{-6}$  Па. При увеличении частоты повторения лазерных импульсов в пять раз от 2 до 10 Гц минимальное давление газа  $P_0$  в вакуумной камере увеличивается в 30 раз, достигая значения  $10^{-3}$  Па при частоте импульсов 10 Гц (рис. 3б).

Таблица 3

**Минимальное давление  $P_0$  в вакуумной камере 1 при различной частоте следования лазерных импульсов**

$f$ , Гц	1	2	4	10
$P_0$	$0,8 \times 10^{-3} P$	$3 \times 10^{-2} P$	$0,2 P$	$P$
$P_0$ , Па	$0,8 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-4}$	$10^{-3}$
$P_2$ , Па	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$

#### Давление во второй вакуумной камере

Вакуумная камера 1 с лазерной мишенью соединена с вакуумной камерой 2 трубопроводом 3, в котором распространяется плазменный факел 4 (см. рис. 1). В камере 2 из лазерной плазмы извлекается и ускоряется ионный пучок под действием электрического поля ионно-оптической системы. В эту камеру также поступают атомы газа из камеры 1, в которой относительно давления  $P_0$  происходят скачки давления, значения которых зависят от частоты работы лазера. Из-за низкой проводимости трубопровода скачки давления в камере 2 будут иметь плавный характер.

Оценим поток газа из камеры 1 через трубопровод длиной  $L = 2$  м и диаметром  $d = 5$  см. Проводимость трубопровода для различных атомов газа при температуре 300 К приведена в табл. 4.

Таблица 4

**Проводимость трубопровода для различных атомов газа**

Атомы	D	N	O
$U$ , л/с	29	11	10

Длинный трубопровод имеет низкую проводимость  $U = 10-29$  л/с по сравнению с эффективной скоростью откачки турбомолеку-

лярного насоса  $S = 460$  л/с. Поэтому эффективная скорость откачки вакуумной камеры через трубопровод с низкой проводимостью  $U$  практически равна проводимости трубопровода  $U$ . Таким образом, основное откачивание вакуумных камер будет происходить собственными турбомолекулярными насосами, установленными на эти камеры, а дополнительное откачивание вакуумных камер через длинный трубопровод насосами соседних камер не будет учитываться. Для оценок будем предполагать, что вакуумные камеры, оснащенные одинаковыми турбомолекулярными насосами, имеют одинаковую форму и габаритные размеры.

Поток газа  $Q_1$  из камеры 1, проходящий через трубу дрейфа, равен потоку газа, входящему в насос камеры 2

$$Q_1 = P_2 S_2 = U(P_0 - P_2),$$

где  $S_2$  – эффективная скорость откачки насоса камеры 2;  $P_2$  – давление в вакуумной камере 2;  $P_0$  – минимальное давление газа в вакуумной камере 1.

Давление в камере 2 равно  $P_2 = P_0 / (1 + S_2 / U)$ . Так как  $S_2 / U \gg 1$ , то  $P_2 = P_0 U / S_2$ . Давление в камере 2 уменьшается в десятки раз ( $S_2 / U$ ) по сравнению с давлением  $P_0$  в вакуумной камере 1. Для ионов азота и кислорода при использовании турбомолекулярного насоса с эффективной скоростью откачки 460 л/с давление  $P_0$  уменьшится почти в 40 раз. В табл. 3 даны значения давлений  $P_2$  в камере 2 при различной частоте работы лазера. Для диапазона частот 1–4 Гц максимальное давление  $5 \times 10^{-6}$  Па в камере 2 находится на уровне остаточного давления. На частоте 10 Гц давление будет на порядок выше остаточного давления. Оценки показывают, что турбомолекулярный насос будет успевать откачивать атомы газа между импульсами лазера до давления  $2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$  Па. При таких давлениях в ЛИС газовая нагрузка линейного ускорителя является низкой. Потери ионного пучка из-за рассеяния на атомах газа, выходящих из ЛИС, будут незначительными. Однако скачок давления атомов газа  $10^{-3}$  Па при испарении мишени на несколько порядков превышает остаточное давление. Вытекание газа из камеры с мишенью в камеру 2 может

повлиять на электрическую прочность ионно-оптической системы извлечения и ускорения ионного пучка.

При выборе типа вакуумного насоса для откачки атомов различных газов (дейтерия, азота, кислорода, хлора, фтора) в частотном режиме работы лазера предпочтительно использовать турбомолекулярные насосы. Они имеют достаточно высокий ресурс работы при больших газовых потоках. Магниторазрядный насос не совсем подходит для применения из-за его низкого ресурса работы при откачке относительно интенсивных газовых потоков химически активных газов. Образование оксидов и нитридов на рабочих пластинах магниторазрядного насоса приведет к сокращению ресурса работы. Магниторазрядный насос больше подходит для поддержания высокого уровня вакуума в ускорителе при отсутствии газовой нагрузки ионного источника.

### Схема вакуумной системы ЛИС

Для получения пучка многозарядных ионов газа на рис. 4 показана схема вакуумной системы, состоящая из двух вакуумных камер  $N1$  и  $N2$ , соединенных трубопроводом для транспортировки плазменного потока от вакуумной камеры 1 к вакуумной камере 2.

Турбомолекулярные насосы  $NT1$  и  $NT2$  используются для откачки вакуумных камер  $N1$  и  $N2$ . Вакуумные затворы  $VT1$  и  $VT2$  служат для перекрытия трубопроводов турбомолекулярных насосов. Турбомолекулярный насос  $NT1$  и форвакуумный насос спирального типа  $NF1$  установлены на изолированной платформе, так как камера 1 и трубопровод находятся под высоким потенциалом. Клапан  $V2$  применяется для отсоединения вакуумной камеры 1 от трубопровода в случае замены лазерной мишени. Клапан  $V7$  используется для отсоединения ЛИС от линейного ускорителя. Клапаны  $V1$ ,  $V5$ ,  $V6$ ,  $V10$  применяются для форвакуумной откачки. Клапаны  $V1$ ,  $V4$ ,  $V6$ ,  $V9$  используются для напуска сухого азота в вакуумные камеры, а также для присоединения течеискателя для поиска вакуумных течей. Для измерения давления в вакуумных камерах применяются низковакуумные и высоковакуумные датчики давления  $PT1-PT4$ ,  $PM1$ ,  $PM2$ .

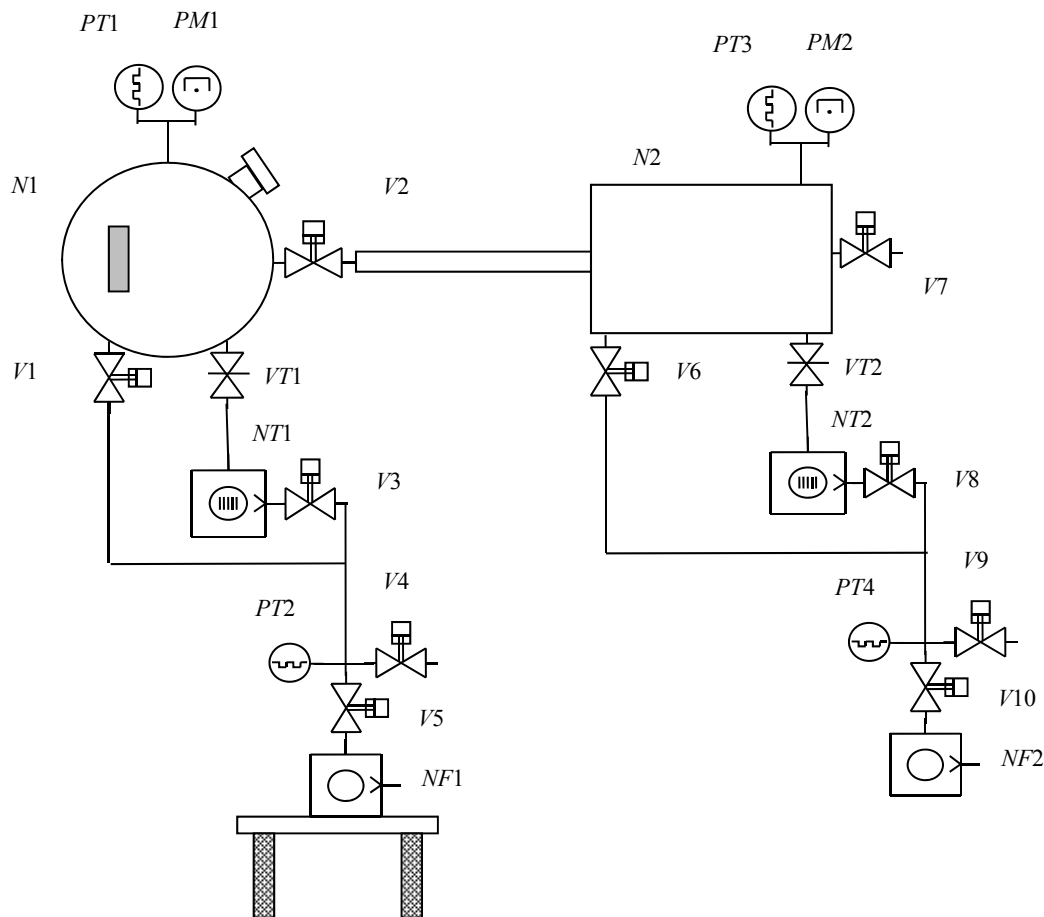


Рис. 4. Схема вакуумной системы ЛИС: N1 – вакуумная камера 1 с мишенью; N2 – вакуумная камера 2; PT1–PT4, PM1, PM2 – вакуумные датчики; NT1, NT2 – турбомолекулярные насосы; VT1, VT2 – вакуумные затворы; V1–V10 – вакуумные клапаны; NF1, NF2 – форвакуумные насосы

### Заключение

Для получения ионов широкого спектра химических элементов можно использовать мишени магнетронных распылительных систем. В результате фокусировки мощного лазерного излучения на мишени происходит испарение, нагрев и ионизация испаренных атомов, минуя жидкую фазу. Для получения пучков многозарядных ионов газа при испарении мишеней, содержащих соответствующие химические соединения, вакуум может значительно ухудшиться, так как насос не будет успевать откачивать атомы газа из вакуумной камеры до следующего лазерного импульса.

Оценки показывают, что скачок давления в вакуумной камере составляет  $10^{-3}$  Па при плотности мощности лазерного излучения на мишени  $10^{11}$ – $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Это давление на три порядка превышает остаточное давление, которое было изначально до включения лазера. В частотном режиме работы лазера с частотой

1 Гц турбомолекулярный насос со скоростью откачки 700 л/с успевает создать давление в вакуумной камере перед следующим лазерным импульсом на уровне остаточного давления  $2 \times 10^{-6}$  Па. При дальнейшем увеличении частоты импульсов лазера в пять раз в диапазоне частот от 2 до 10 Гц минимальное давление в вакуумной камере с мишенью возрастает на несколько порядков, достигая значения  $10^{-3}$  Па. Минимальное давление зависит от частоты лазерных импульсов, объема вакуумной камеры, скорости откачки турбомолекулярного насоса и скачка давления атомов газа в момент испарения мишени.

Газ, вытекающий из первой вакуумной камеры с лазерной мишенью, откачивается во второй вакуумной камере, соединенной с первой длинным трубопроводом. В этой камере из плазменного факела извлекается пучок многозарядных ионов. Оценки показывают, что давление в ней не превышает  $2 \times 10^{-5}$  Па, что не создает значительной газовой нагрузки для линейного ускорителя. Приведена схема



вакуумной системы ЛИС на основе двух вакуумных камер, оснащенных турбомолекулярными насосами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zhao H. Y., Zhang J. J., Jin Q. Y., Liu W., Wang G. C., Sun L. T., Zhang X. Z., Zhao H. W. / Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. P. 02A917.
2. Yeates P., Costello J. T., Kennedy E. T. / Physics of Plasmas. 2010. Vol. 17 (12). P. 123115.
3. Apollonov V. V., Silnov M. S. / Int. J. Phys. Stud. Res. 2018. Vol. 1 (1). P. 25.
4. Ikeda S., Okamura M., Kanesue T., Raparia D., Hershcovitch A., Yip K., Takahashi K., Wu D., Cannavo A., Ceccio G. / Rev. Sci. Instrum. 2020. Vol. 91. P. 023304.
5. Apollonov V. V., Silnov M. S. / Int. J. Phys. Stud. Res. 2018. Vol. 1 (1). P. 11.
6. Ананьин О. Б., Афанасьев Ю. В., Быковский Ю. А., Крохин О. Н. Лазерная плазма. Физика и применения. – М.: МИФИ, 2003.
7. Kulevoy T. V., Losev A. A., Alekseev P. N., Satov Yu. A., Shumshurov A. V., Lagov P. B., Letovaltseva M. E., Zinoviev S. A. / J. Phys.: Conf. Ser. 2022. Vol. 2244. P. 012096.
8. Okamura M. / Matter and Radiation at Extremes. 2018. Vol. 3 (2). P. 61.
9. Kanesue T., Fuwa Y., Kondo K., Okamura M. / Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. P. 193506.
10. Глазков А. А., Мальшев И. Ф., Саксаганский Г. А. Вакуумные системы электрофизических установок. – М.: Атомиздат, 1975.
11. Аполлонов В. В. / Вестник РАЕН. 2020. Т. 20 (3). С. 35.

PACS 07.77.Ka

## Vacuum system of a laser source of deuterium, nitrogen and oxygen ions for a linear accelerator

V. N. Pashentsev<sup>1</sup> and E. V. Pashentseva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI.  
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University.  
1 st. Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

Received 13.01.2023; revised 22.01.2023; accepted 30.01.2023

*The laser ion source is a universal plasma source for obtaining a wide range of multiply charged ions. To obtain gas ions, targets are used whose chemical composition contains gas atoms. As a result of target evaporation by a focused laser beam, a pressure jump occurs in the vacuum chamber. The pressure of gas atoms depends on the mass of the evaporated substance, the frequency of repetition of laser pulses, the chemical composition of the targets, the volume of the vacuum chamber, and the pumping speed. Estimates of pressures in the vacuum chamber in single and periodic laser operation modes with a frequency of 1–10 Hz for a power density of  $10^{11}$ – $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> are given. When the laser operates at a frequency of 1 Hz, the pressure in the vacuum chamber is at the level of the residual pressure in the vacuum chamber  $2 \times 10^{-6}$  Pa. As the frequency increases, the minimum pressure increases, since the vacuum pump does not have time to pump out the gas atoms before the next laser pulse. For a frequency of 10 Hz, the minimum pressure in the vacuum chamber increases by several orders of magnitude. A diagram of the vacuum system of a laser ion source based on turbo pumps with a pumping rate of 700 l/s is presented.*

*Keywords:* laser ion source, deuterium, oxygen, nitrogen, laser, pulse frequency, pressure, vacuum chamber.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-71-80

## REFERENCES

1. Zhao H. Y., Zhang J. J., Jin Q. Y., Liu W., Wang G. C., Sun L. T., Zhang X. Z. and Zhao H. W., *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 02A917 (2016).
2. Yeates P., Costello J. T. and Kennedy E. T., *Physics of Plasmas* **17** (12), 123115 (2010).
3. Apollonov V. V. and Silnov M. S., *Int. J. Phys. Stud. Res.* **1** (1), 25 (2018).
4. Ikeda S., Okamura M., Kanesue T., Raparia D., Hershcovitch A., Yip K., Takahashi K, Wu D., Cannavo A. and Ceccio G., *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 023304 (2020).
5. Apollonov V. V. and Silnov M. S., *Int. J. Phys. Stud. Res.* **1** (1), 11 (2018).
6. Ananin O. B., Afanasiev Yu. V., Bykovsky Yu. A. and Krokhin O. N., *Laser plasma. Physics and applications*, Moscow, MEPhI, 2003.
7. Kulevoy T. V., Losev A. A., Alekseev P. N., Satov Yu. A., Shumshurov A. V., Lagov P. B., Letovaltseva M. E. and Zinoviev S. A., *J. Phys.: Conf. Ser.* **2244**, 012096 (2022).
8. Okamura M., *Matter and Radiation at Extremes.* **3** (2), 61 (2018).
9. Kanesue T., Fuwa Y., Kondo K. and Okamura M., *Appl. Phys. Lett.* **105**, 193506 (2014).
10. Glazkov A. A., Malyshev I. F. and Saksagansky G. A., *Vacuum systems of electrophysical installations*, Moscow, Atomizdat, 1975.
11. Apollonov V. V., *Bulletin of RANS* **20** (3), 35 (2020).