

Новые возможности пушек с плазменным катодом: получение сверхтонких стационарных электронных пучков

С.Ю. Корнилов, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050 Россия, Томск
e-mail: kornilov@ms.tusur.ru

Представлены результаты исследований направленных на получение электронного пучка с минимальным диаметром и углом расходимости в электронной пушке с плазменным катодом. Впервые в системе с плазменным катодом получены пучки с энергией 30-50кэВ, мощностью несколько киловатт, с диаметром порядка 200-250мкм и углом расходимости не более 0,05рад. С использованием полученных результатов было создано электронно-лучевое оборудование для исследований пылевой плазмы и газовых потоков.

Введение

Электронные пушки с плазменным катодом, предназначенные для получения непрерывных сфокусированных электронных пучков, уже длительное время используются в промышленности [1-3]. Спрос на эти пушки в последнее десятилетие был обусловлен, как минимум, двумя факторами. Первый из них – это отсутствие производителей термокатодного электронно-лучевого оборудования на территории России. Второй – надежная работа пушек с плазменным катодом в различных, нередко тяжелых, условиях эксплуатации. Повышенная надежность пушек была в немалой степени обусловлена отказом от использования в аппаратуре питания высоковольтных выпрямителей переменного тока промышленной частоты. Эти выпрямители при пробое в электронной пушке из-за значительной энергии, запасенной в емкостном фильтре, были способны разрушить активные элементы аппаратуры питания даже при совершенной защите. Был осуществлен переход на источники, основанные на высокочастотной преобразовательной технике. Это позволило принципиально снизить массогабаритные показатели аппаратуры, упростить решение вопросов автоматического управления параметрами пушки и технологическим процессом в целом. Однако важнее было то, что высоковольтные источники нового типа, в отличие от 50-ти герцовых выпрямителей, не содержали в конечных каскадах выпрямителей значительные по емкости конденсаторы. В итоге пробой высоковольтного промежутка пушек, избавиться от которых, особенно в условиях несовершенного вакуума, сложно, уже не приводили к таким катастрофическим последствиям для аппаратуры питания, как это было ранее.

Традиционно пушки с плазменным катодом разрабатывались для электронно-лучевой сварки [3]. Кроме того, создавалось оборудование для относительно новых, наплавочных технологий. Эти технологии специально ориентировались на способности пушек надежно работать как в обычных, так и в тяжелых вакуумных условиях [2].

Считалось, что область применения электронных пушек с плазменным катодом ограничена из-за проблем получения пучков с плотностью мощности $\geq 10^6 \text{Вт/см}^2$. Это связывалось с относительно высокой температурой электронов в плазменных катодах. Однако влияние высокой температуры электронов на параметры фокусировки пучков детально не исследовалось. Вопрос об ограничениях, накладываемых на возможности пушек с плазменным катодом по фокусировке, считался классическим и решенным, исследования в этой области – не перспективными. Однако в последние годы появился спрос на сверхтонкие электронные пучки, связанный как с появлением новых лучевых технологий, так и с возобновлением экспериментов по выводу сфокусированных пучков через газодинамические окна в область повышенного давления. Спрос явился стимулом для ревизии некоторых традиционных представлений о предельных параметрах пушек с плазменным катодом.

Простые оценки влияния параметров эмитирующей плазмы на фокусировку могут быть выполнены на основе известного выражения Ленгмюра [4] для предельной плотности электронного тока:

$$j_i = j_0 \cdot \left[\frac{eU_{\delta n \bar{e}}}{kT_e} + 1 \right] \cdot \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

где T_e – электронная температура, $U_{\delta n \bar{e}}$ – ускоряющее напряжение, k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона, α – угол расходимости пучка.

Учитывая, что в электронных пушках $eU_{\delta n \bar{e}} \gg kT_e$, выражение (1) может быть записано в виде

$$j_i = j_0 \cdot \frac{eU_{\delta n \bar{e}}}{kT_e}. \quad (2)$$

В этом выражении плотность эмиссионного тока из плазмы j_0 можно записать как

$$j_0 = n_0 e \left(\frac{2kT_e}{\pi m} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где n_0 – концентрация плазмы, m – масса электрона.

Объединяя (2) и (3), получим соотношение вида

$$j_i = n_0 e^2 U_{\delta n \bar{e}} \left(\frac{2}{\pi k m T_e} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что для получения пучков с большой плотностью тока необходимо стремиться к высокой концентрации плазмы в области эмиссии. Для типичных параметров плазменного катода минимальный размер электронного пучка, например, при токе 100мА и ускоряющем напряжении 30кВ, как это следует из (4), составляет несколько десятков микрон, а плотность мощности $\sim 10^8 \text{Вт/см}^2$. Это означает, что полученные ранее в системах с плазменным катодом параметры сфокусированных электронных пучков не являются физически предельными и возможно их улучшение. Кроме того, практически на всех этапах совершенствования пушек с плазменным катодом применялись типовые фокусирующие электромагнитные линзы, их модернизации внимание не уделялось.

В настоящей работе представлены результаты предварительных исследований, направленных на получение сверхтонких стационарных пучков в электронных пушках на основе отражательного разряда с полым катодом. Исследования проводились в двух направлениях: изучение режимов и оптимизация первичного формирования пучка и совершенствование системы фокусировки ускоренных электронов.

Первичное формирование пучка

Схема компьютерной модели формирования и ускорения электронного пучка в источнике с плазменным катодом показана на рис.1. Под действием электрического поля электрода 3 невозмущенная газоразрядная плазма 1 отделяется от области ускорения электронного пучка условной границей (эмитирующей поверхностью), размер, форма и пространственное положение которой могут изменяться. На рис. 1 показаны траектории электронов, а также положение и форма эмитирующей поверхности плазмы, рассчитанные при различных значениях ускоряющего электрического поля.

Можно выделить три режима (рис. 1а–1в) формирования пучка, различающихся положением и формой эмитирующей поверхности плазмы, наличием кроссовера и углом расходимости пучка. Переход из одного режима в другой происходит при изменении ускоряющего напряжения или геометрических размеров электронно-оптической системы.

В работе [5] показано, что при проникновении плазмы в эмиссионный канал ее концентрация уменьшается.

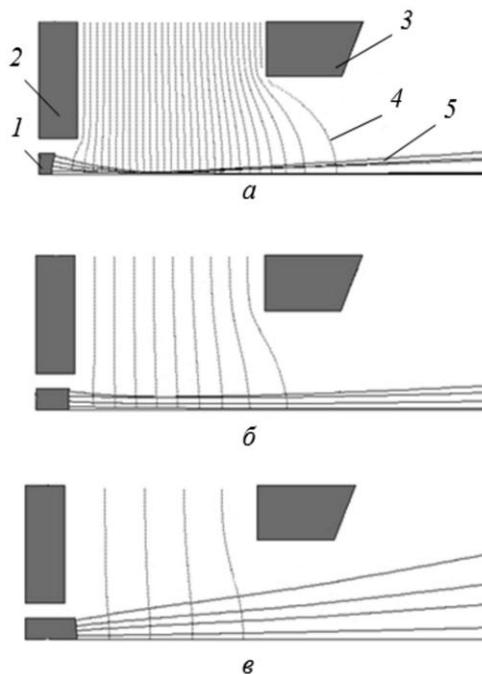


Рис. 1. Траектории электронов в электронной пушке с плазменным катодом при различных значениях ускоряющего напряжения: 30 (а), 10 (б), 5кВ (в). Ток пучка 50мА. 1 – эмитирующая плазма, 2 – эмиттерный катод, 3 – ускоряющий электрод, 4 – силовые линии электрического поля.

При одинаковой концентрации плазмы в разряде в режимах, представленных на рис. 1б, 1в, плотность эмиссионного тока будет ниже, чем в режиме на рис. 1а. Таким образом, оптимальным для получения наибольшей плотности эмиссионного тока является режим, при котором эмитирующая поверхность плазмы находится в глубине эмиссионного канала (рис. 1а).

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования пучка выполнены на установке, схема которой показана на рис. 2.

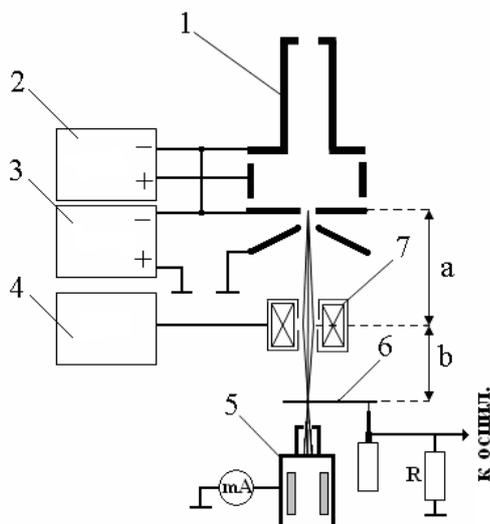


Рис. 2. Схема установки для исследования пучка. 1 – электронная пушка с плазменным катодом; 2 – блок питания разряда, 3 – высоковольтный источник, 4 – блок питания фокусирующей системы, 5 – коллектор, 6 – двойной вращающийся зонд, 7 –фокусирующая система.

Диаметр пучка измерялся двойным вращающимся зондом 7 [6]. Сигнал с зонда регистрировался осциллографом. Полученная зондограмма пересчитывалась в распределение плотности тока по радиусу пучка.

На рис. 3 в качестве примера приведены нормированные зависимость тока на зонд (1) и восстановленное распределение плотности тока в пучке (2). Диаметр пучка определялся на полувысоте распределения плотности тока.

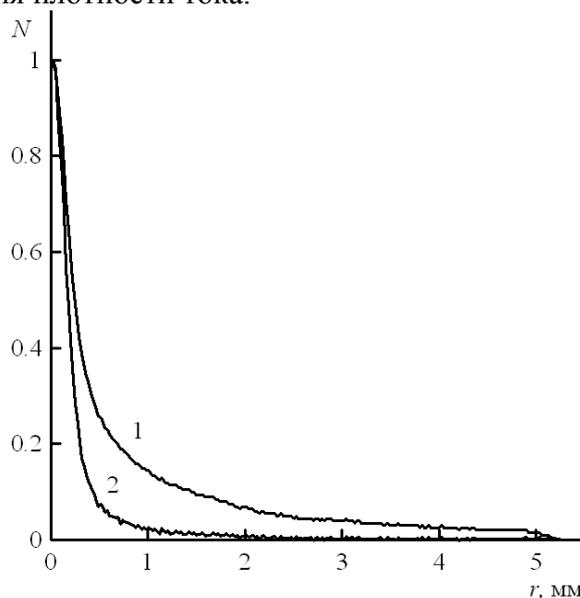


Рис. 3. Нормированные зависимость тока на зонд (1) и распределение плотности тока в пучке (2) вдоль радиуса пучка.

Результаты экспериментов

В первой серии экспериментов измерялись зависимости минимального диаметра пучка d_r от ускоряющего напряжения $U_{уск}$ и расстояния d между эмиттерным катодом и ускоряющим электродом. Эти зависимости приведены на рис. 4.

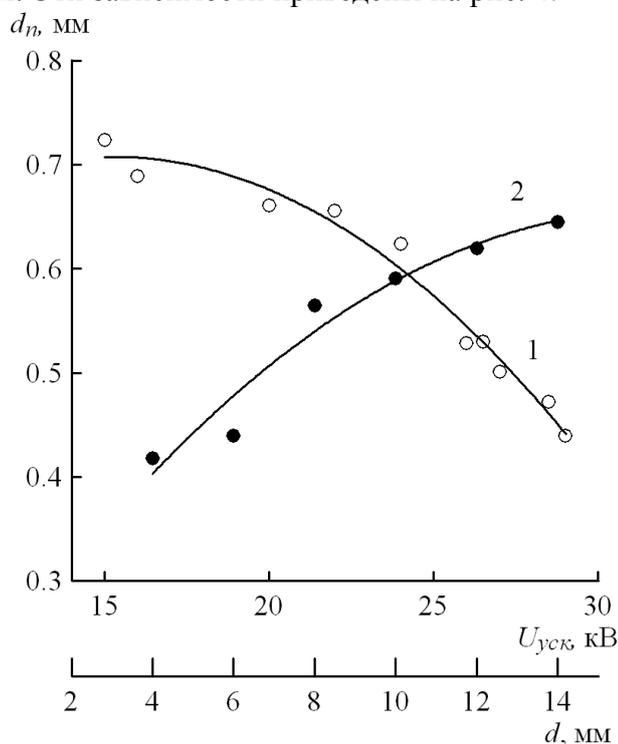


Рис. 4. Зависимость диаметра пучка от ускоряющего напряжения при $d = 6$ мм (1) и от расстояния между эмиттерным катодом и ускоряющим электродом при $U_{о́тл} = 30$ кВ (2). Ток пучка $I_r = 50$ мА.

Измерения проводились при токе пучка 50 мА. Неизменными в эксперименте поддерживались расстояния между эмиттерным катодом и линзой, и между линзой и плоскостью фокусировки, обозначенные на рис. 2 как a и b соответственно. Ток фокусировки каждый раз выставлялся таким, чтобы диаметр пучка d_r в плоскости

фокусировки был минимален. Диапазон изменения величин $U_{\text{о\ddot{n}e}}$ и d подбирался так, чтобы можно было реализовать все три режима работы плазменного эмиттера.

Полученные результаты подтвердили предположение о влиянии на предельные параметры пучка режимов работы плазменного катода. Подбором оптимальных соотношений $U_{\text{о\ddot{n}e}}$ и d , можно добиться уменьшения диаметра пучка в 1,5–2 раза.

Значительное влияние на диаметр пучка оказывает соотношение размеров a и b . Если ввести по аналогии с геометрической оптикой понятие коэффициента увеличения линзы $\Gamma = b/a$, то зависимость минимального диаметра пучка от этого коэффициента оказывается практически линейной (рис. 5).

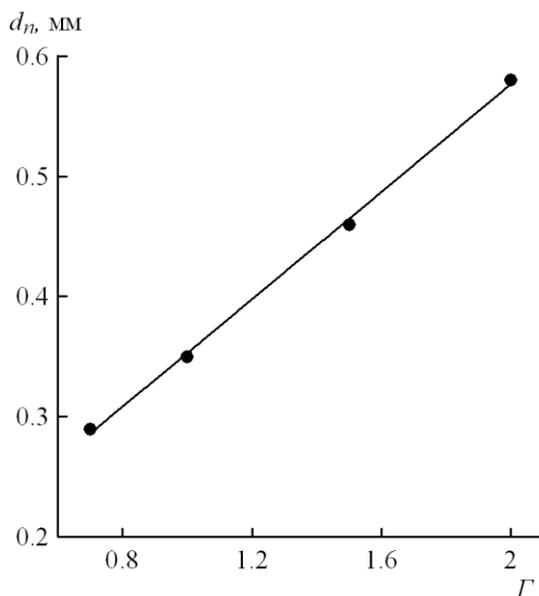


Рис. 5. Зависимость минимального диаметра пучка от коэффициента увеличения при $I_n = 50$ мА и $U_{\text{уск}} = 20$ кВ.

Значения параметров a и b не могут выбираться произвольно. При значительном уменьшении b может возрастать угол сходимости пучка, что не всегда приемлемо с точки зрения технологического применения пучка. При слишком больших значениях a расходящийся электронный пучок может попасть на фокусирующую систему и вывести ее из строя. Указанные проблемы могут быть решены, если использовать двухлинзовую фокусирующую систему. Дополнительная линза помещается между эмиттером и основной линзой, снижая угол расходимости пучка.

Использование двухлинзовой системы позволило получать пучки с диаметром $\sim 0,2$ – $0,25$ мм на рабочих расстояниях b порядка 100 мм. и обеспечить удовлетворительную фокусировку пучка на больших расстояниях. Так, например, на расстоянии 0,5 м от фокусирующей системы диаметр пучка с энергией 50 кэВ и током 100 мА не превышал 0,8 мм. При этом угол сходимости пучка составлял всего 0,05 рад.

Диаметр сфокусированного пучка зависит от тока пучка (рис. 5), но эта зависимость не является значительной. Из полученных данных следует, что при изменении тока на порядок его диаметр меняется не более чем на 40%. Зависимости токов фокусирующих линз, необходимых для получения минимального диаметра пучка, от тока пучка горизонтальны. Это говорит о том, что положение фокальной плоскости пучка не меняется при регулировании его тока.

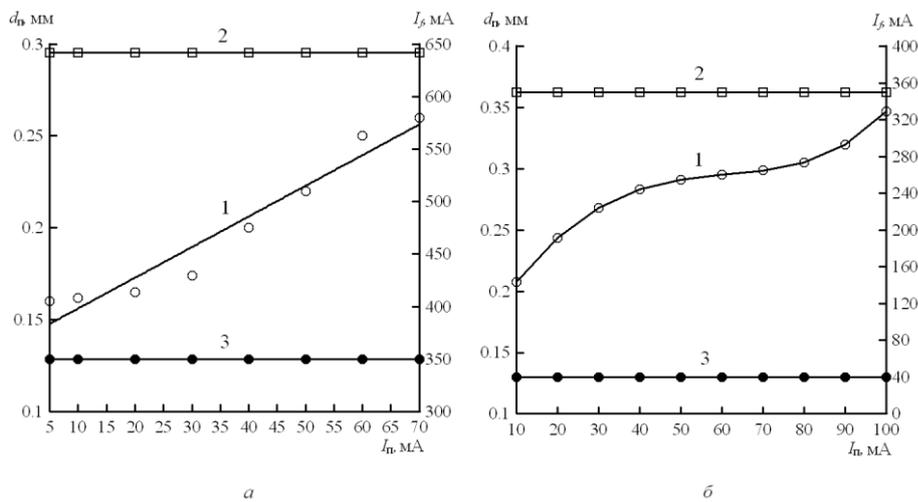


Рис. 5. Зависимость диаметра пучка (1), тока основной линзы (2) и тока дополнительной линзы (3) от тока пучка при $U_{0\text{н\acute{e}}} = 50 \text{ kV}$ (а) и 25 kV (б)

На рис. 6 представлены характеристики электронного пучка пушки с плазменным катодом.

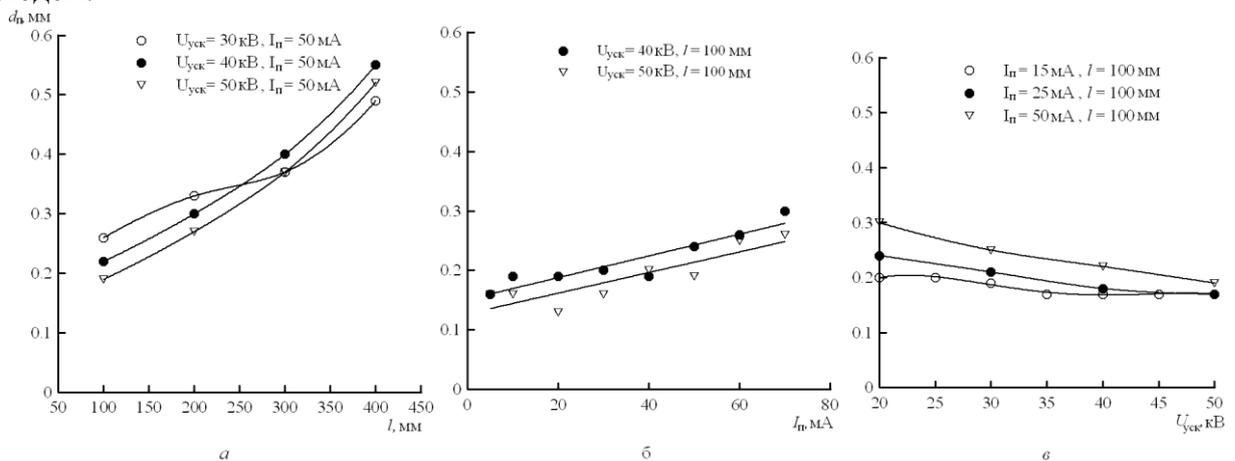


Рис. 6. Зависимость минимального диаметра пучка от расстояния до фокусирующей системы (а), тока пучка (б) и ускоряющего напряжения (в).

Внешний вид пушки с двумя фокусирующими линзами показан на рис. 7. Подбор оптимального режима работы плазменного катода позволил получить рекордно минимальные для электронных пушек с плазменным катодом значения диаметра пучка.



Рис. 7. Внешний вид пушки с двухлинзовой фокусирующей системой.

Примеры использования сверхтонких электронных пучков в научных исследованиях

Электронные пушки с плазменным катодом, формирующие сверхтонкие электронные пучки, вошли в состав созданных в Объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН), г.Москва и Новосибирском государственном университете исследовательских установок.

В ОИВТ РАН проводятся эксперименты по изучению свойств пылевой плазмы [7]. Установка для исследования пылевой плазмы состоит из двух камер. В одной из них размещается электронная пушка, вторая предназначена для проведения экспериментов (рис. 8). Электронный пучок из камеры с высоким вакуумом выводится в камеру, давление газов в которой составляет 0,01 - 10Торр.

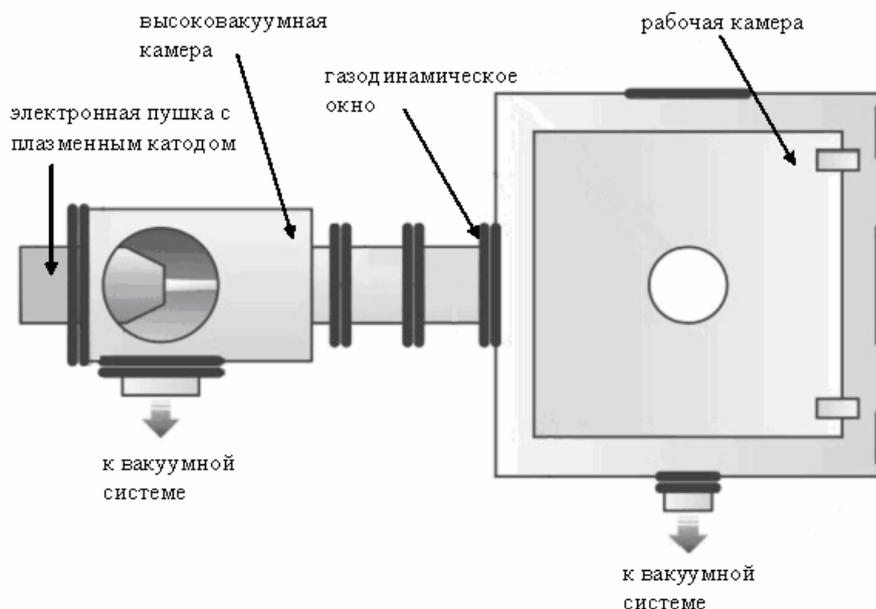


Рис. 8. Схема вакуумной установки для исследования пылевой плазмы.

Камеры соединены между собой газодинамическим окном, которое обеспечивает необходимый перепад давлений между ними.

Ранее в экспериментах использовались электронные пушки с накаливаемым катодом. В первой камере для поддержания работоспособности пушки обеспечивалось давление не хуже 10^{-5} Торр. Это означало, что на газодинамическом окне необходимо было создавать перепад давления, в зависимости от условий эксперимента, от трех до шести порядков. Такой перепад обеспечивался протяженным каналом малого диаметра. Замена термокатодной пушки на пушку с плазменным катодом обеспечило установке целый ряд преимуществ. Пушка с плазменным катодом не критична к вакуумным условиям и в случае прорыва атмосферы не теряет своей работоспособности. Кроме того, такой тип пушек может устойчиво работать при давлении около 10^{-4} - 10^{-3} Торр. Это позволяет не менее чем на порядок снизить перепад давления между камерами и упростить конструкцию газодинамического окна.

В Новосибирском государственном университете сверхтонкий слаборасходящийся пучок используется для диагностики газовых струй. Внешний вид установки с пушкой показан на рис. 9.

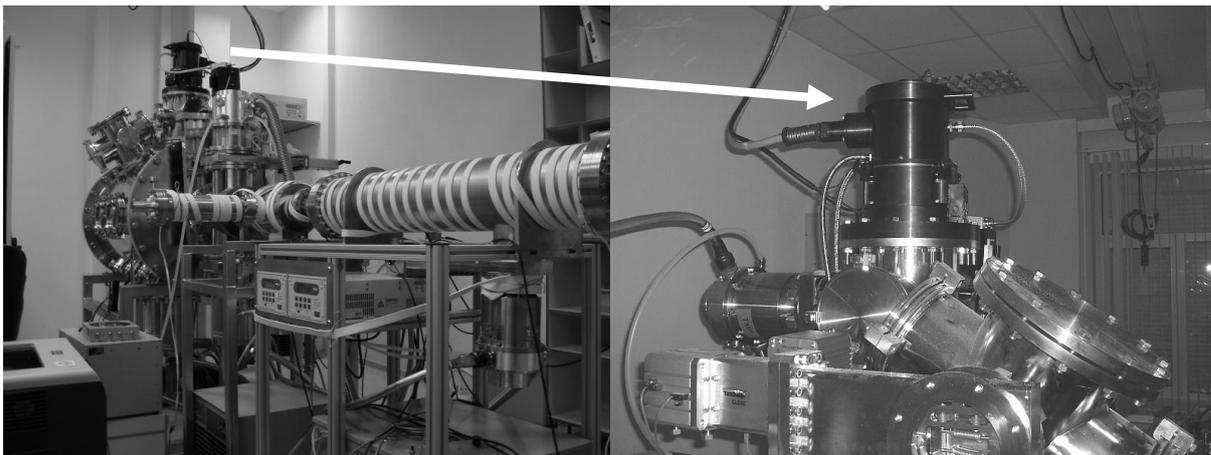


Рис. 9. Установка для исследования газовых струй в Новосибирском государственном университете.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность получения в пушках с плазменным катодом пучков, плотность мощности которых в 5 – 7 раз превышает ранее достигнутую. Созданы электронные пушки с параметрами пучка, которые ранее не достигались. Эти пушки нашли применение, как в традиционных вакуумных электронно-лучевых технологиях, так и в условиях, при которых повышенные требования к геометрическим размерам электронного пучка становятся определяющими.

Список литературы

- [1]. *Крейндель Ю.Е.* Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977.
- [2]. *Belyuk S.I., Rau A.G., Osipov I.V., Rempe N.G. et al.* // 8-th International Conference on Electron Beam Technologies. (EBT 2006) Varna, Bulgaria. 5–10 June. 2006. P. 112.
- [3]. *Osipov I.V., Rempe N.G.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71(4). P. 1638.
- [4]. *Пирс Дж.* Теория и расчет электронных пучков. М.: Советское радио, 1956.
- [5]. *Галанский В.А., Груздев В.А., Зеленский В.И., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 4. С. 168.
- [6]. *Osipov I.V., Kornilov S.Yu., Rempe N.G.* // 17-th International Conference on High-Power Particle Beams. (Beams 2008). Institute of Fluid Physic, Xi'an, China. 6–11 July. 2008. P. 404.
- [7]. *Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф.* // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 5. С. 495.