

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 537.534.2

**СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИМПЛАНТЕРНЫХ ИОННЫХ
ИСТОЧНИКОВ**

**©2026 г. А. В. Бруль, Р. В. Вахрушев, С. Г. Константинов, Е. И. Кузьмин,
В. В. Куркучев, В. В. Орешонок, В. А. Павлюченко*, В. Ф. Складов,
А. В. Сорокин, А. А. Старостенко, П. В. Усов, А. С. Цыганов, И. Н. Чуркин,
И. В. Шиховцев**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. академика Лаврентьева, 11

**E-mail: V.A.Pavlyuchenko@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 10.12.2025

После доработки 22.04.2026

Принята к публикации 30.04.2026

Представлено описание специализированного экспериментального стенда, разработанного в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН для исследования ионных источников, применяемых в системах ионной имплантации полупроводниковых структур. Стенд предназначен для отработки технологий формирования и транспортировки ионных пучков с параметрами, критичными для производства полупроводниковых элементов, используемых в микроэлектронной промышленности: энергия до 80 кэВ, ток до 100 мА, эмиттанс около $5.2 \cdot 10^{-3} \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ (для ионов аргона). Описаны ключевые компоненты стенда: модульная высоковольтная система питания, базовые методы диагностики ионного пучка, а также автоматизированная вакуумная система.

Ключевые слова: ионные источники, вакуумная система, автоматизация, измерение тока пучка, диагностика ионных пучков

1. ВВЕДЕНИЕ

В производстве полупроводниковых элементов, используемых в микроэлектронной промышленности, активно применяются системы ионной имплантации, позволяющие легировать кремниевые пластины необходимыми химическими элементами. В частности, с 1970-х годов, когда начался переход производства интегральных схем с биполярных на полевые транзисторы с изолированным затвором, ионная имплантация является одной из основных технологий масштабирования комплементарных металлооксидных полупроводниковых

структур [1]. Путем имплантации ионов в кремниевую пластину получают зоны с различными типами проводимости, комбинируя которые, можно получить транзисторы, являющиеся основным элементом микросхем.

Для разных задач требуется имплантация ионов различной энергии [2]. Например, в диапазоне энергий имплантации от 0.2 до 200 кэВ формируются основные области субмикронных МОП-транзисторов: сток, исток, поликремневый затвор, канал и другие. Ионы с энергией от 150 до 3000 кэВ используются для формирования ретроградных “карманов”, ячеек приборов с зарядовой связью, скрытых слоев субколлектора биполярных транзисторов, областей с повышенной концентрацией носителей, используемых в технологиях биполярных транзисторов с изолированным затвором и других технологиях.

Изготовление полупроводниковых элементов с использованием технологического процесса в диапазоне 180–90 нм требует ионной имплантации с энергией от 80 до 270 кэВ. При требовании к технологическому процессу меньшего масштаба (менее 90 нм) необходима имплантация ионов с более низкой энергией. В настоящее время на мировом рынке представлено несколько промышленных моделей систем ионной имплантации. Примером компаний, поставляющих такие установки, являются AMAT (VISta) [3], Nissin Electric (EXCEED) [4], Axcelies (Purion H) [5] и другие.

Характеристики ионных пучков, генерируемых источником ионов в имплантере, в значительной степени определяют достижимые параметры всей установки. По этой причине определение параметров ионных пучков, генерируемых источниками ионов, является важной задачей.

Одним из основных типов ионных источников, используемых в промышленных образцах имплантеров, являются источники типа Чавета–Бернаса [6]. В основных экспериментальных режимах предполагается использование ионного источника с энергией экстракции до 80 кэВ и током до 100 мА при работе с благородными газами ($^{20}\text{Ne}^+$, $^{40}\text{Ar}^+$, $^{84}\text{Kr}^+$) (см. рис. 1).

Рис. 1. Общий вид источника ионов

Магнит источника ионов рассчитан на создание дипольного поля в области газоразрядной камеры со значением около 0.02 Тл. Расчеты экстракции и формирования пучка были выполнены с использованием кода PBGUNS для ионов аргона [7]. Согласно этим расчетам, для щелевой оптики (межэлектродный зазор был принят равным 10 мм) минимальная угловая расходимость в направлении поперек щели достигается при токе около 190 мА и составляет

около 9 мрад. Нормализованный эмиттанс пучка равен примерно $5.2 \cdot 10^{-3} \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Требуемое напряжение на запирающий электрод составляет около -3 кВ при токе до 20 мА.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Испытательный стенд для источника ионов разработан на основе существующего вакуумного объема диаметром 0.7 м и длиной 3 м. Источник ионов подключен с торца вакуумной камеры через шиберный затвор DN160 ISO-K, а на противоположном торце расположен приемник пучка со встроенным массивом вторично-эмиссионных датчиков, размещенных крестообразно. Приемник пучка имеет водяное охлаждение. Датчики позволяют измерять распределение профиля плотности мощности пучка на приемнике. Вакуумная камера имеет порты различного диаметра, которые служат для применения дополнительных методов диагностики пучка и подключения вакуумного оборудования.

Стенд оснащен автоматизированной двухступенчатой системой вакуумной откачки, а также системой подачи рабочего газа в ионный источник. Система контроля и управления вакуумом обеспечивает непрерывный мониторинг показаний вакуумных датчиков и осуществляет управление оборудованием (затворами, клапанами, двумя турбомолекулярными и одним форвакуумным насосами) по заданному алгоритму. Система построена на основе распределенной архитектуры с конфигурируемым контроллером. Три модуля MDS DIO-16BD отвечают за работу клапанов, затворов и насосов. Контроль вакуумного давления обеспечивают вакуумметры МТН10D (от $5 \cdot 10^{-8}$ до 10^4 Па) и МТР4D (от 10^{-2} до 10^4 Па), установленные на вакуумном объеме, ионном источнике и форвакуумной линии. Система также генерирует оптические сигналы блокировок состояния по вакуумным условиям, которые используются при управлении испытательным стендом.

Автоматика реализует три различных сценария работы вакуумной системы: откачка отдельных элементов (вакуумный объем тракта или отдельно ионный источник) или всего испытательного стенда в целом. Количество поддерживаемых сценариев и их конкретная логика могут быть изменены программным образом. В каждом сценарии предусмотрена последовательность действий по управлению оборудованием для предварительной откачки объемов до 1 Па с последующим переходом к высоким значениям вакуума ($10^{-6} - 10^{-4}$ Па). Также предусмотрены меры защиты для различных аварийных ситуаций.

Газовакуумная система стенда позволяет достигать величин остаточного вакуума в основном объеме до 10^{-3} Па, а в области газоразрядной камеры ионного источника – 10^{-2} Па. Типичные значения величин остаточного вакуума в системе в зависимости от времени

приведены на рис. 2. В момент времени t_1 происходит подача рабочего газа (аргона) в газоразрядную камеру ионного источника. При этом отсекающий шибер между ионным источником и основным объемом закрыт. Для уменьшения газового потока в основной объем шибер открывается в момент времени t_2 . Следует отметить, что одной из конструктивных особенностей испытуемого ионного источника является возможность осуществления дифференциальной откачки.

Рис. 2. Динамика остаточного давления в вакуумной камере стенда

Схема системы электропитания испытательного стенда (рис. 3) аналогична схеме, использованной в работе [8]. Испытательный стенд питается от промышленной трехфазной сети переменного тока (400 В, 50 Гц). Система электропитания состоит из источников питания, расположенных на потенциале земли, и источников питания, расположенных на высоковольтном потенциале (в специальном изолированном блоке с потенциалом 80 кВ). Параметры источников питания испытательного стенда приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры источников питания, используемых на испытательном стенде

	Вых. напр., кВ	Макс. вых. ток, А	Вых. мощность, кВт	Пульсации вых. напр.	Управление
Электрод-экстрактор: TLP2041P100-10000	≤ 100	≤ 0.100	10	1%	аналоговое, RS-485
Запирающий электрод: TD2200N5-600	≤ -5	≤ 0.120	600	1%	аналоговое, RS-485
Магнит ионного источника: IT-M3112S	≤ 0.06	≤ 20	0.200	<100 мВ	аналоговое, RS-485
Источник питания накала катода	≤ 0.005	≤ 60	0.300	1%	аналоговое
Источник питания смещения накала	≤ 0.6	≤ 2	1.2	1%	аналоговое
Источник питания дугового разряда	≤ 0.15	≤ 7	1.1	1%	аналоговое

Управление источниками осуществляется с помощью специального модуля (контроллер управления), расположенного в том же изолированном блоке. Связь с модулем осуществляется по оптическому каналу с использованием протокола MODBUS RTU. При работе с ионным источником каждый источник питания дугового разряда может управляться независимо.

Система управления стендом построена на распределенной архитектуре с использованием нескольких программируемых логических модулей:

- контроллер источника питания дугового разряда (расположен на высоковольтном потенциале);
- два контроллера для управления работой источников питания, расположенных на потенциале земли (ускоряющее напряжение, запирающее напряжение, а также магнит источника ионов);
- блок измерения с массива вторично-эмиссионных датчиков.

Помимо управления источниками питания, вышеупомянутые контроллеры также реализуют логику защиты и имеют оптические входы для подключения сигналов блокировок. Это обеспечивает отключение оборудования в случае обнаружения аварийных состояний.

3. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

Основными характеристиками ионного пучка являются полный ток, энергия, угловая расходимость, сорт частиц, а также его профиль и геометрические размеры. Измерение этих параметров пучка важно для его дальнейшей транспортировки.

Энергия частиц на выходе из ускоряющей системы ионного источника соответствует полному ускоряющему напряжению в ионно-оптической системе (ИОС), измеряемому высоковольтным делителем в системе питания электродов.

При условии, что промежуточный электрод полностью запирает электроны из вторичной плазмы, полный ток ионного пучка, извлекаемого из ИОС, может быть определен как ток нагрузки высоковольтного электрода. Зависимости величины вытягиваемого тока ионов и величины напряжения, приложенного к электроду-экстрактору, приведены на рис. 4. Осцилляции ионного тока, по-видимому, связаны со спецификой газового разряда в ионном источнике. Для измерения тока пучка используются токовые датчики.

Рис. 4. Зависимости тока ионного пучка и величины напряжения, приложенного к электроду-экстрактору, от времени

Угловая расходимость пучка на выходе из источника ионов вдоль эмиссионной щели слабо зависит от режима работы источника и определяется тепловым разбросом ионов в плазме. Среднеквадратичное значение угловой расходимости пучка вдоль щели на основании моделирования при помощи кода PBGUNS оценивается величиной не более 9 мрад. Угловая расходимость пучка поперек эмиссионной щели существенно зависит от ускоряющего напряжения и плотности плазмы в источнике. Среднеквадратичное значение угловой

расходимости пучка поперек щели ИОС может варьироваться в диапазоне от 10 до 30 мрад, где 10 мрад является минимальной угловой расходимостью при оптимальных параметрах работы ИОС. Для измерения угловой расходимости и определения оптимальных параметров пучка обычно измеряется профиль пучка. Ожидаемый профиль пучка при номинальных параметрах вдоль и поперек эмиссионной щели на разных расстояниях от ИОС показан на рис. 5. Профиль плотности пучка был построен, исходя из предположения, что частицы пучка имеют гауссово распределение по углам. Для измерения профиля пучка в плоскости, перпендикулярной движению пучка на испытательном стенде, используется несколько методов диагностики.

Рис. 5. Расчетные профили пучка ионов

В первом методе используется массив токовых датчиков, представляющих собой цилиндры Фарадея, установленные на расстоянии 1.7 м от ИОС. Датчики заполняются квадратно-гнездовым образом область размером $82 \times 62 \text{ мм}^2$ с шагом в горизонтальном и вертикальном направлениях, равным 10 мм. Перед датчиками устанавливается маска с массивом круглых отверстий для выделения части пучка. На каждом датчике измеряется стекающий заряд от выделенной части пучка. Из-за ионно-электронной эмиссии, вызванной бомбардировкой датчиков ионным пучком, измерения тока с датчиков будут включать вклад как ионного, так и электронного тока: $I_S = I_i + I_e$. Вклад электронов в измеряемый ток $I_e = k I_i$ сильно зависит от коэффициента вторичной эмиссии k и может привести к значительной погрешности измерений. Чтобы сделать измерения тока независимыми от коэффициента вторичной эмиссии, между маской и датчиком устанавливается дополнительный электрод, на который подается отрицательное напряжение для возврата электронов, выбитых с поверхности датчика. Таким образом, электроны не дают существенного вклада в измеряемый ток пучка. Этот способ диагностики позволяет измерить трехмерный профиль плотности тока пучка с пространственным разрешением около 8 мм. Пространственное разрешение может быть улучшено путем замены маски.

Полный ток определяется интегрированием профиля плотности тока пучка. Размер пучка также определяется по профилю пучка. Относительная погрешность измерения ожидаемого минимального размера пучка поперек и вдоль щели ИОС в одном импульсе составляет не более 17% и 11% соответственно. Для перемещения системы в поперечном направлении используется механический ввод с шаговым двигателем, что позволяет “сканировать” пучок поперек сечения. При этом погрешность измерения за серию импульсов при сканировании пучка сводится к нескольким процентам.

Второй метод диагностики – это крест вторично-эмиссионных датчиков. Данная система состоит из металлического диска (маски) с отверстиями диаметром 2.5 мм. Напротив каждого отверстия расположены изолированные друг от друга датчики, с которых снимается полезный сигнал. Такой способ диагностики позволяет осуществлять контроль положения оси пучка, его поперечных размеров и угловой расходимости. Система датчиков установлена на расстоянии 2.8 м от источника ионов. Одна линейка датчиков ориентирована вдоль эмиссионной щели ИОС, вторая линейка – поперек. На рис. 6 показан расчетный профиль пучка поперек щели эмиссии при разных значениях угловых расходимостей пучка. Данная система вторично-эмиссионных датчиков рассчитана на измерение профиля пучка размером до $200 \times 180 \text{ мм}^2$. Поперек щели ИОС расстояние между датчиками составляет 20 мм, а вдоль щели – 30 мм. Относительная погрешность измерения ожидаемого минимального размера пучка (за счет геометрических размеров системы диагностики) составляет не более 17% и 25% для измерений поперек щели и вдоль щели соответственно. Как говорилось ранее, система датчиков установлена на торце вакуумного объема и является основным поглотителем пучка.

Рис. 6. Расчетный профиль пучка ионов на расстоянии 2.8 м от источника ионов при разных значениях угловой расходимости

Контроль эмиттанса пучка играет ключевую роль в обеспечении высокой точности и однородности имплантации. Для измерения эмиттанса пучка используется способ диагностики на основе метода “perfor-plot”, суть которого заключается в измерении и анализе отдельных обрезанных пучков, фильтруемых перегородкой с набором щелей определенных формы и размера. Распределение этих пучков фиксируется с помощью съемки быстрой камерой профиля, высвечиваемого на люминесцирующей керамике.

Маска, установленная на пути движения пучка ионов, выделяет те области пучка, которые падают на люминофор и вызывают его свечение. При этом существенным фактором, влияющим на корректность измерений, является поперечный размер отдельных наблюдаемых областей свечения люминофора, который связан с геометрическими параметрами маски, расстоянием между маской и люминофорным экраном, а также угловым разбросом самого ионного пучка. Величина перекрытия траекторий отдельных выделенных областей исходного пучка была оценена в зависимости от количества и размера щелей. При оценке бралось распределение ионов по углу, описываемое функцией Гаусса, с дисперсией 0.25° , а расстояние до источника ионов считалось равным 2 м. Ожидаемое распределение тока пучка вдоль маски с набором щелей представлено на рис. 7. Величина тока падающего на люминофор пучка пропорциональна интенсивности вторичного излучения в видимом диапазоне. Красная

штриховая линия соответствует щели шириной 1 мм, а синяя линия – бесконечно малой щели (предельный случай). Как видно, профиль с размером щели в 1 мм не вносит существенного искажения в измерение эмиттанса и позволяет получить высокое разрешение для ленточного пучка с размером $50 \times 2 \text{ мм}^2$ и угловой расходимостью до 0.5° . Геометрия системы измерений приведено на рис. 8.

Рис. 7. Расчетное распределение тока пучка после прохождения щелевой маски

Рис. 8. Геометрия системы регистрации профиля пучка после прохождения щелевой маски

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящий момент подготовлен испытательный стенд, включающий в себя газовакуумную систему, систему высоковольтного питания ионного источника, а также разные методы диагностики, которые могут быть использованы для определения основных характеристик ионных пучков. Начаты первые испытания перспективного образца ионного источника типа Чавета–Бернаса, который впоследствии может быть использован, в частности, для технологий имплантации ионов в полупроводниковые материалы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Current M.I.* // MRS OPL. 1993. V. 316. P. 297. <https://doi.org/10.1557/PROC-316-297>
2. *Rubin L., Poate J.* Ion Implantation in Silicon Technology. // Industrial Physicist. 2003. V. 9. № 3. P. 12.
3. *Rodier D., Olson J.* // AIP Conf. Proc. 2011. V. 1321. P. 361. <https://doi.org/10.1063/1.3548420>.
4. *Nagai N., Tamura Y., Yuasa S., et al.* // Proc. 2000 Int. Conf. Ion Implant. Technol. (Cat. No.00EX432). 2000. P. 415. <https://doi.org/10.1109/IIT.2000.924176>.
5. *Vanderberg B., Heres P., Eisner E., Libby B., Valinski J., Huff W.* // Proc. 20th Int. Conf. Ion Implant. Technol. 2014. V. 1321. P. 12. <https://doi.org/10.1109/IIT.2014.6940041>.
6. *Chavet I., Bernas R.* // Nucl. Instrum. Methods. 1967. V. 51. № 1. P. 77. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(67\)90365-5](https://doi.org/10.1016/0029-554X(67)90365-5).

7. *Boers J.E.* // IEEE Conf. Plasma Sci. (ICOPS). 1993. P. 213.
<https://doi.org/10.1109/PLASMA.1993.593577> .
8. *Farley M., Rose P., Ryding G.* // The Physics and Technology of Ion Sources / ed. By I.G. Brown, Wiley-VCH, 2004. P. 133. <https://doi.org/10.1002/3527603956>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Общий вид источника ионов: 1 – источник плазмы, 2 – изоляторный узел, 3 – магнит источника ионов, 4 – узел экстракции, 5 – сильфонный блок, 6 – механическая регулировка, 7 – шиббер, 8 – фланец для вакуумной откачки.
- Рис. 2.** Динамика остаточного давления в вакуумной камере стенда: **а** – давление в камере ионного источника, **б** – давление в основном объеме. Подача рабочего газа происходит в момент времени t_1 , открытие шиббера между камерами ионного источника и основным объемом – в момент времени t_2 .
- Рис. 3.** Блок-схема системы электропитания источника ионов.
- Рис. 4.** Зависимости тока ионного пучка и величины напряжения, приложенного к электроду-экстрактору, от времени: 1 – ток пучка ионов, 2 – напряжение на электроде-экстракторе.
- Рис. 5.** Расчетные профили пучка ионов: поперек (**а**) и вдоль (**б**) эмиссионной щели на разных расстояниях от ИОС.
- Рис. 6.** Расчетный профиль пучка ионов на расстоянии 2.8 м от источника ионов при разных значениях угловой расходимости.
- Рис. 7.** Расчетное распределение тока пучка после прохождения щелевой маски (расстояние между маской и люминофором – 200 мм, число щелей – 6 шт., ширина щелей – 1 мм). Штриховая линия соответствует значению ширины щели, равному 1 мм; сплошная линия – предельному случаю бесконечно тонкой щели.
- Рис. 8.** Геометрия системы регистрации профиля пучка после прохождения щелевой маски.

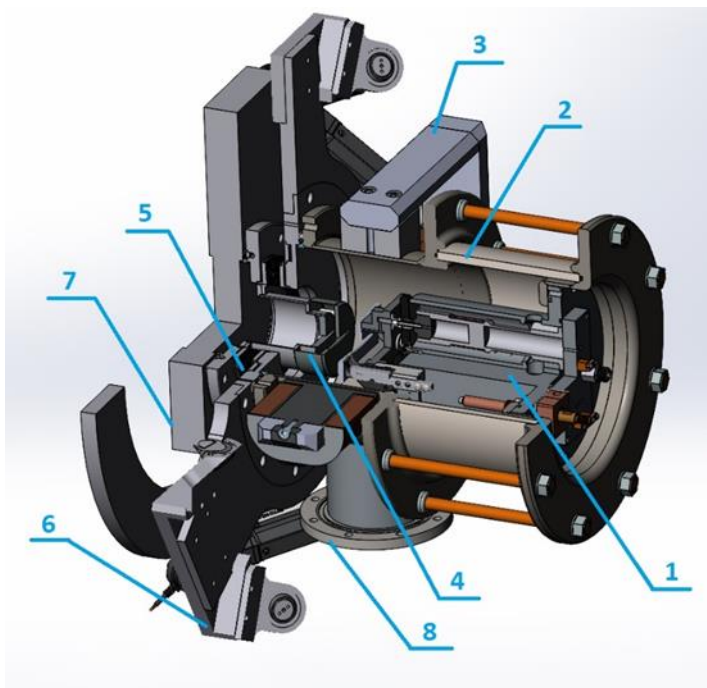


Рис. 1.

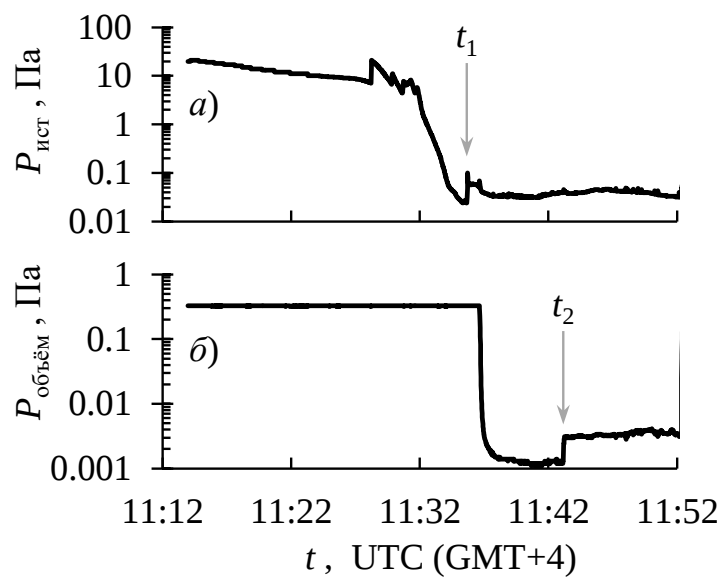


Рис. 2.

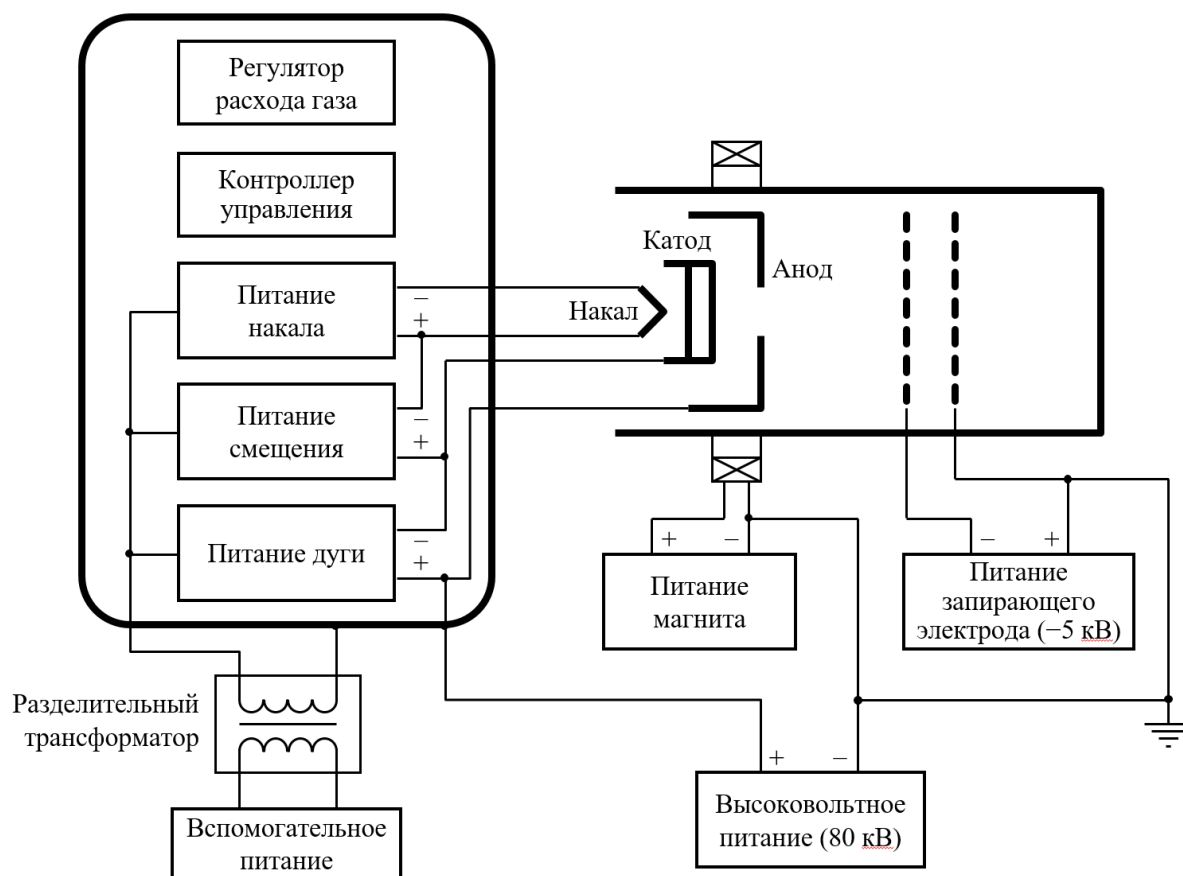


Рис. 3.

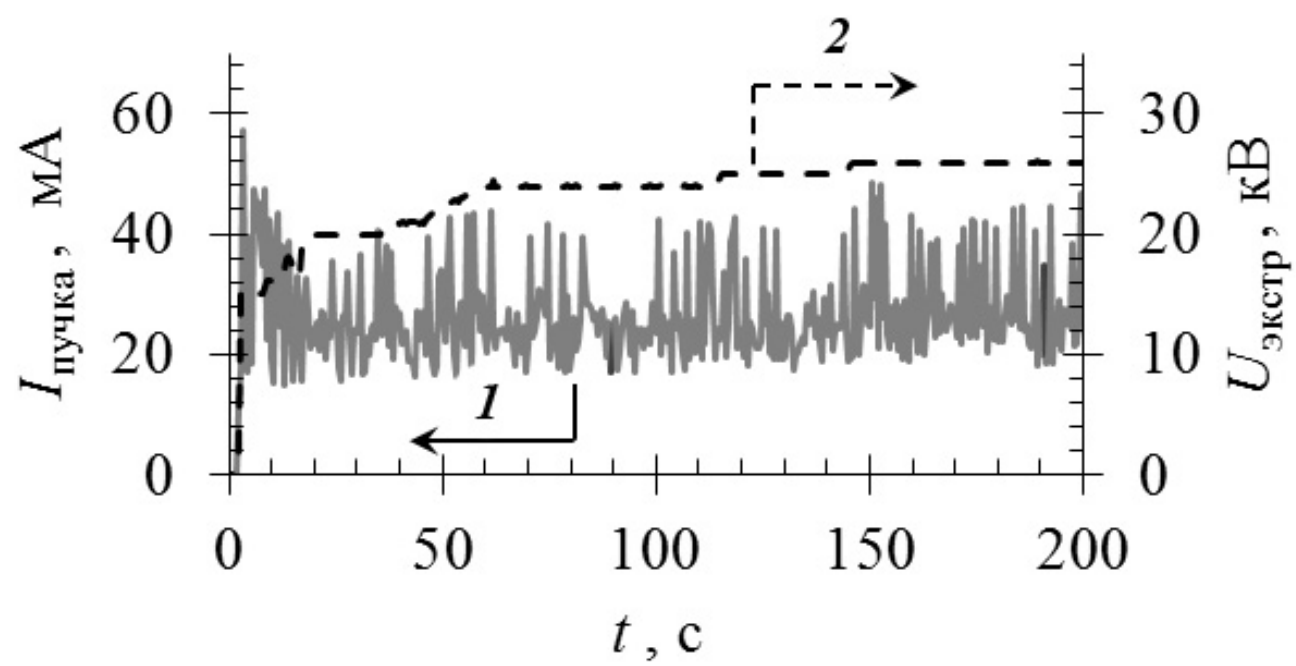


Рис. 4

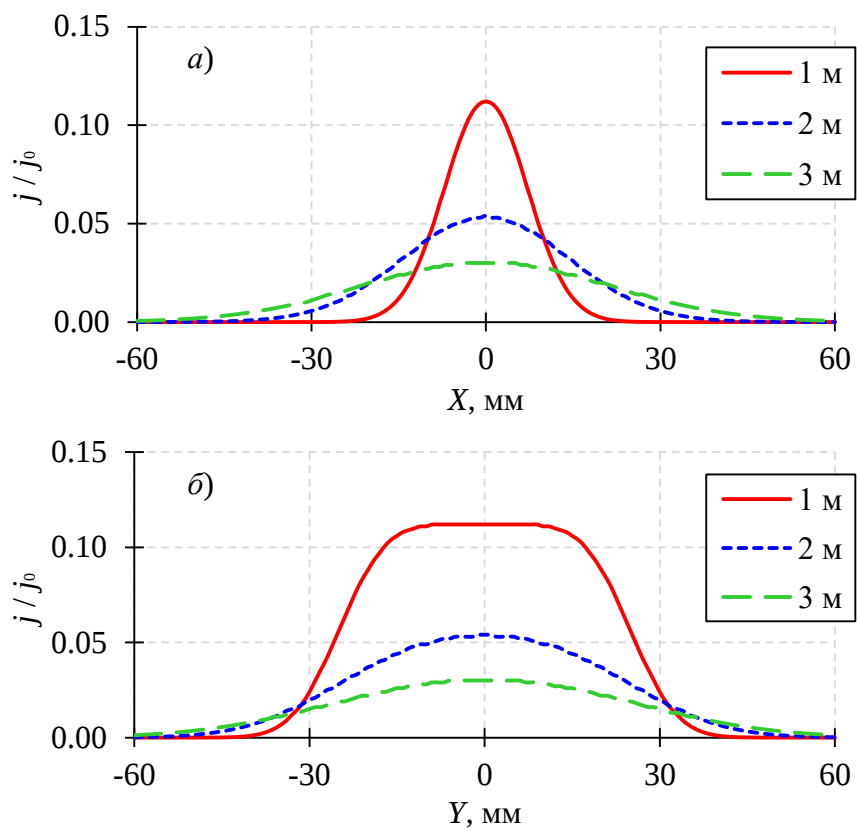


Рис. 5.

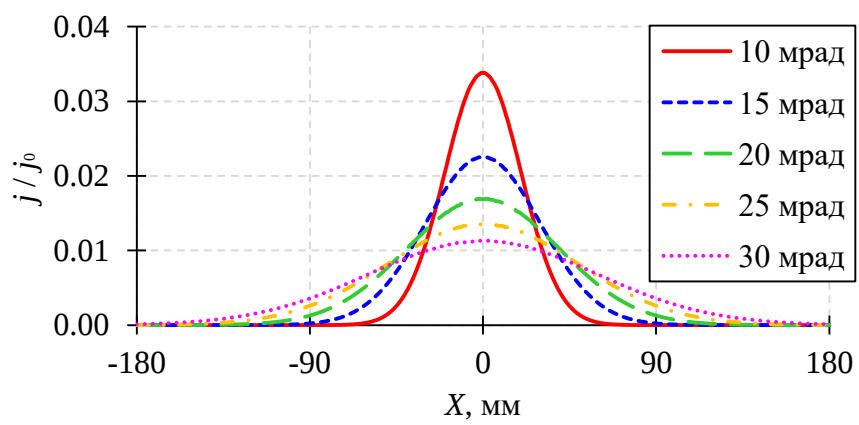


Рис. 6.

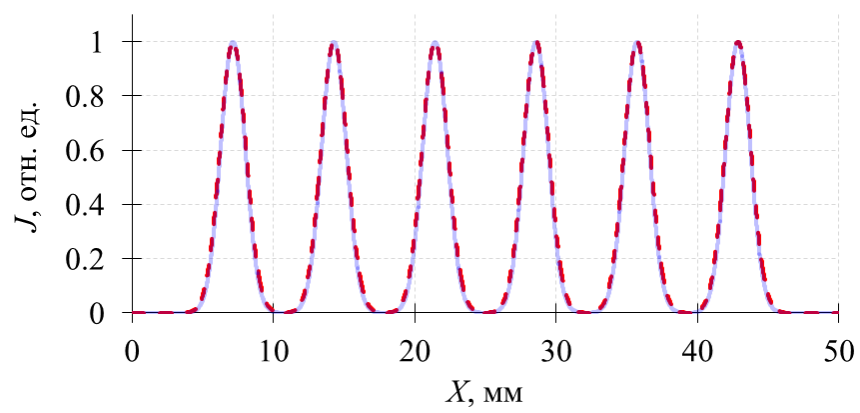


Рис. 7.

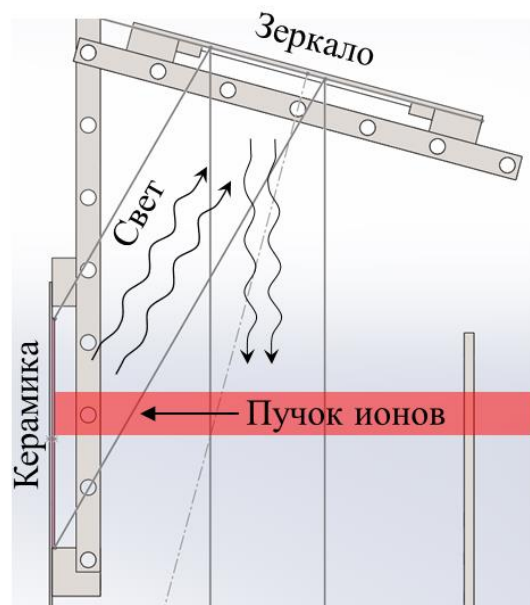
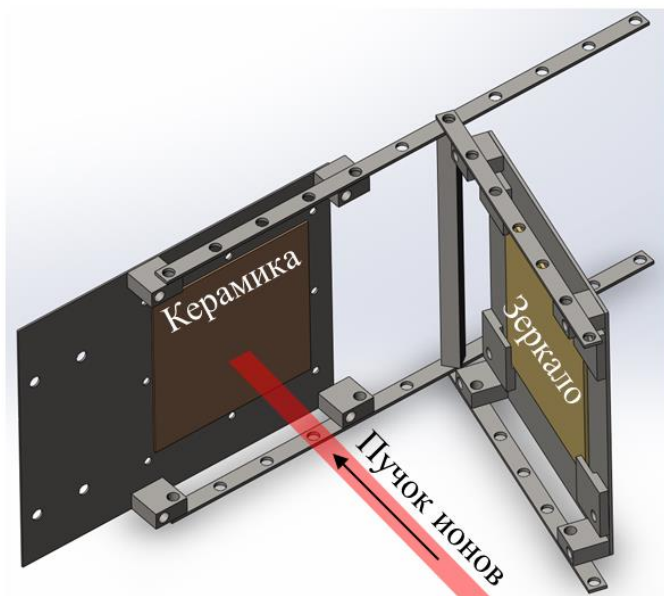


Рис. 8.