

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное агентство по образованию

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НГУ)**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени магистра**

Кафедра физики плазмы

Бутов Антон Александрович

Название работы

**Плазменный эмиттер на основе полого катода для формирования
сильноточного электронного пучка**

Научные руководители:

д. ф.-м. н. Бурдаков Александр Владимирович

к. т. н. Деревянкин Геннадий Егорович

Новосибирск – 2009 год

Содержание

1	ВВЕДЕНИЕ	3
2	ПЛАЗМЕННЫЙ ЭМИТТЕР	5
3	ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК С ПОЛЫМ КАТОДОМ	6
4	ПОЛЫЙ КАТОД	7
5	СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА	9
6	ЧЕТЫРЕХСЕТОЧНЫЙ ДАТЧИК ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ	11
7	РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ	11
7.1	ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	11
7.2	АНОДНЫЙ ТОК	12
7.3	ПРОФИЛИ ЭМИССИИ ПЛАЗМЫ	13
7.4	СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ	17
8	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	21

1 Введение

Задача получения интенсивного электронного пучка появилась в связи с проблемой нагрева и удержания плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3. В экспериментах по нагреву плазмы электронным пучком было обнаружено, что во время прохождения пучка через плазму в ней подавлена продольная теплопроводность и вследствие этого достигается высокая температура плазмы. В настоящее время генератором пучка служит установка У-2, и длительность пучка на ней составляет 10–12 мксек.

Для увеличения времени удержания плазмы в ГОЛ-3 хотелось бы иметь мощный электронный пучок длительностью не менее 100 микросекунд, током около 10 кА и плотностью тока пучка внутри ловушки около 1 кА/см². Поскольку в ловушке магнитное поле составляет около 5 Т, то предполагается сжатие пучка при инжекции, нужна исходная плотность тока эмиссии 20 – 100 А/см² и небольшая угловая расходимость, чтобы пучок не отражался от магнитной пробки. Угловую расходимость можно оценить исходя из сохранения магнитного момента $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}$, тогда условие прохождения: $\sin^2 \theta < \frac{1}{K}$, где К – пробочное отношение. Если поле снаружи ~ 1 кГс, то К=50 и $\theta \leq 8^{\circ}$.

Основной частью генератора пучка является источник электронов. Из требования на плотность тока и длительность импульса инжекции пучка следует, что в качестве эмиттеров электронов возможны следующие: эмиттер со взрывной эмиссией, термоэмиссионный эмиттер и плазменный эмиттер. Получение мощного пучка длительностью 100 и более микросекунд с помощью взрывоэмиссионного катода, который используется на установке У-2, представляется проблематичным из-за появления на поверхности катода плотной расширяющейся плазмы, которая через некоторое время замыкает накоротко диод, ограничивая этим длительность пучка. Термоэмиссионные эмиттеры обычно используются в хороших вакуумных условиях, а при взаимодействии с плазмой их срок службы резко сокращается. Также при больших токах эмиссии в термоэмиттерах требуется большая мощность нагрева для поддержания высокой температуры катода. Поэтому для поставленной задачи больше всего подходит плазменный эмиттер электронов.

Чтобы проверить возможность получения пучка требуемой длительности на основе плазменного эмиттера, был создан экспериментальный стенд, состоящий из дугового источника плазмы, системы ускоряющих электродов и системы питания. Дуговой источник плазмы аналогичен по конструкции тем, что применяются в ИЯФ для получения пучков нейтральных атомов водорода. [1] В первых экспериментах на стенде без магнитного поля были получены привлекательные результаты: ток пучка составлял 100 А, плотность тока эмиссии 100 А/см^2 при напряжении на ускоряющем зазоре $\sim 30 \text{ кВ}$. [2] Но в магнитном поле $\sim 1 \text{ кГс}$ максимальные параметры уменьшились более, чем в два раза

Была сформулирована рабочая гипотеза, которая заключается в том, что причиной пробоев являются особенности дугового генератора плазмы. Источником электронов в дуге является катодное пятно, в котором плотность тока очень велика (до 10^7 А/см^2). Без магнитного поля, образуемая за счет мощной эмиссии электронов из катодного пятна и вытекающая из сопла дугового генератора в объем экспандера плазменная струя расширяется. А в сильном внешнем магнитном поле электроны замагничиваются, и катодное пятно проецируется на плоскость эмиссионных отверстий, что приводит к неподконтрольному непомерному увеличению плотности потока в области электронно-оптической системы, что может служить причиной пробоев.

Одно из решений этой проблемы – замена дугового источника плазмы на источник с другим механизмом генерации электронов и поддержания разряда. В связи с этим было решено проводить эксперименты с источником плазмы на основе сильноточного тлеющего разряда в полем катоде. Тлеющий разряд отличается от дугового источника тем, что электроны образуются в нем по всей поверхности. [3] Предполагается, что с источником плазмы с полым катодом не будет локально большой плотности потока в магнитном поле и пробоев электронно-оптической системы, а, значит, удастся получить требуемые параметры пучка.

Целью работы было получение сильноточного тлеющего разряда в полем катоде в сильном магнитном поле и изучение его эмиссионных характеристик.

2 Плазменный эмиттер

На рис. 1 изображена общая схема плазменного эмиттера. Рассмотрим принцип его работы. В замкнутом объеме находится плазма, между объемом и вытягивающим электродом создается разность потенциалов. Как известно для электронной эмиссии плотность тока, ограниченного объёмным зарядом, представляется в виде [4]:

$$j = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2},$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона, U – напряжение между электродами, d – расстояние между электродами.

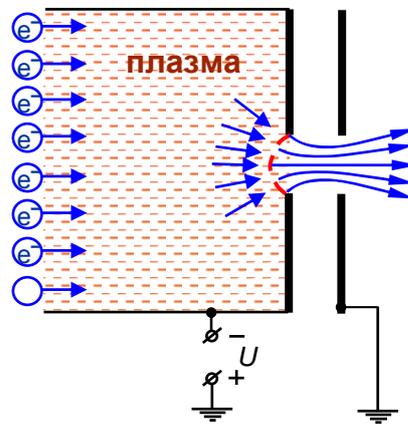


Рис. 1. Плазменный эмиттер

Направленная или термическая плотность потока электронов j_e , падающих на эмиссионную поверхность из плазмы определяется только свойствами плазмы (для максвелловского распределения $j_e = \frac{en_e \langle v \rangle}{4}$, n_e – плотность электронов, $\langle v \rangle$ – средняя тепловая скорость). Поэтому из условия $j_e = j$ следует, что:

$$j_e = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d_{эфф}^2},$$

где: $d_{эфф}$ – ширина слоя объёмного заряда, отделяющего вытягивающий электрод от границы плазмы. Однако изменение U теперь влияет не на плотность электронного тока, которая зависит только от параметров плазмы, а на форму и положение плазменной границы. [5]

3 Плазменный источник с полым катодом

Открытие разряда в системе с полым катодом принадлежит немецкому физику Пашену (1916 г). Он использовал такую форму катода для исследования спектра тлеющего разряда в гелии. С этого времени полый катод стал привлекать внимание многих исследователей. [6]



Рис. 2. а) Распределение потенциала в тлеющем разряде с полым катодом
б) Траектория электрона, эмитированного из катода

Рассмотрим особенности возникновения и развития разряда в системе с полым катодом. По мере увеличения напряжения потенциал анода начинает все глубже "проваливаться" в отверстие катода. Примерная картина распределения потенциала электрического поля изображена на рис. 2а. Основной особенностью разряда с полым катодом является осцилляция электронов, которая возникает из-за наличия внутри катода потенциальной ямы. При рассмотрении картины потенциала до возникновения разряда можно увидеть, что эквипотенциальные поверхности заходят в катод, то есть линии поля частично проникают внутрь катода и симметрично расходятся от центра, подходя к внутренней поверхности катода под прямым углом. Это распределение поля и обеспечивает многократное колебательное движение электрона (рис. 2б), прежде чем он достигнет выходного отверстия катода или исчезнет в результате рекомбинации. Высокая эффективность ионизации достигается за счет большого числа столкновений электронов с молекулами газа при колебании электронов. Образование новых электронов идет за счет γ – процессов. [7]

Существуют конфигурации разряда с горячим полым катодом [8], когда температура катода поддерживается на уровне 1000–1500 °С, и эмиссия первичных электронов достигается за счет термоэмиссии. В данной работе рассматривается разряд в холодном полым катодом.

4 Полюй катод

Для экспериментов с разрядом, полюй катод был изготовлен на основе катода водородного тиратрона ТГИ-325/16, который является оксидным, т.е. имеет более низкую работу выхода электронов, чем чисто металлический. В оксидном катоде в качестве эмиссионно-активного вещества используются окислы редкоземельных металлов, в котором благодаря процессам диссоциации или химического восстановления появляется избыток атомов металла на поверхности катода, обеспечивающий необходимую электропроводность слоя и эмиссию электронов с катода. Также имеет значение активирование оксидного слоя за счет реакции восстановления окиси бария водородом: $BaO_{(r)} + H_{2(r)} = Ba_{(r)} + H_2O_{(r)}$. Этот процесс является по существу основным для катодов тиратронов с водородным наполнением. [8]

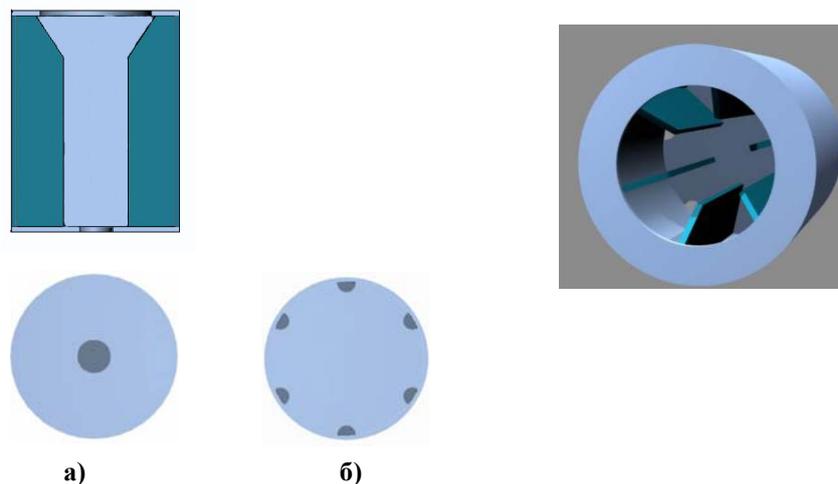


Рис. 3. Полюй катод

Конструкция полого катода представлена на рис. 3. Катод имеет цилиндрическую форму с продольными ребрами внутри. Диаметр катода составляет 18 мм, длина катода – 24 мм, отверстие в передней стенке – 12 мм и полная площадь эмитирующей поверхности составляет 27 см^2 . Этим достигается умеренная плотность тока на поверхности катода при высокой эмиссионной плотности плазмы на выходе из катода. В первых экспериментах для подачи газа на задней стенке было сделано одно центральное отверстие диаметром 2 мм (рис. 3а), но тлеющий разряд получить не удалось, так как разряд сразу возникал в дуговой форме. Поэтому для подачи газа был сделан ряд отверстий (около 20) меньшего диаметра, расположенных непосредственно у боковой поверхности

(рис. 3б), чтобы избежать плотной струи газа в центре и немедленного срыва в дугу. На расстоянии около 2 мм от катода расположен анод с отверстием закрытым сеткой.

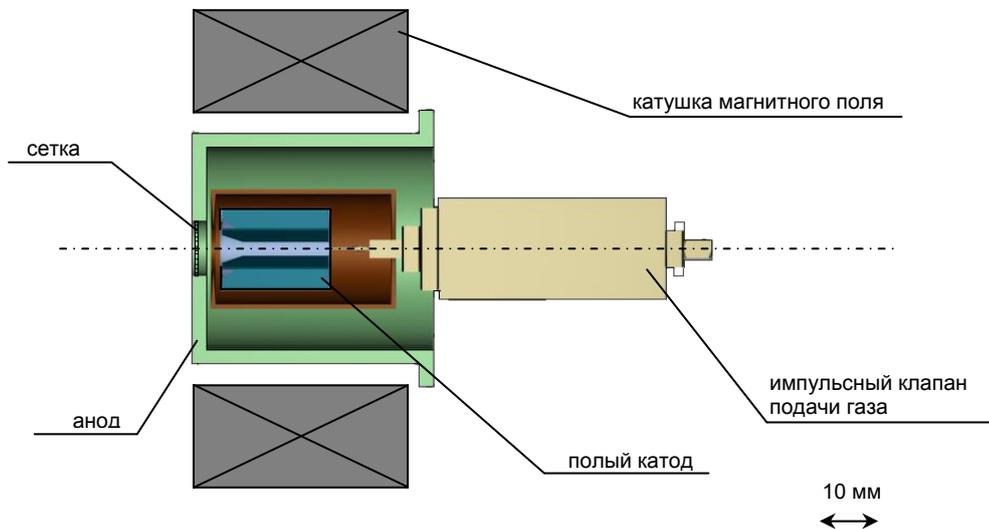


Рис. 4. Схема источника плазмы с полым катодом

Как уже упоминалось, генерация пучка будет проводиться в магнитном поле, поэтому полый катод помещен в поле, которое создается катушкой (рис. 4). Разряд и катушка размещены в вакуумной камере, в которой турбомолекулярным насосом поддерживается остаточное давление $\sim 10^{-5}$ торр.

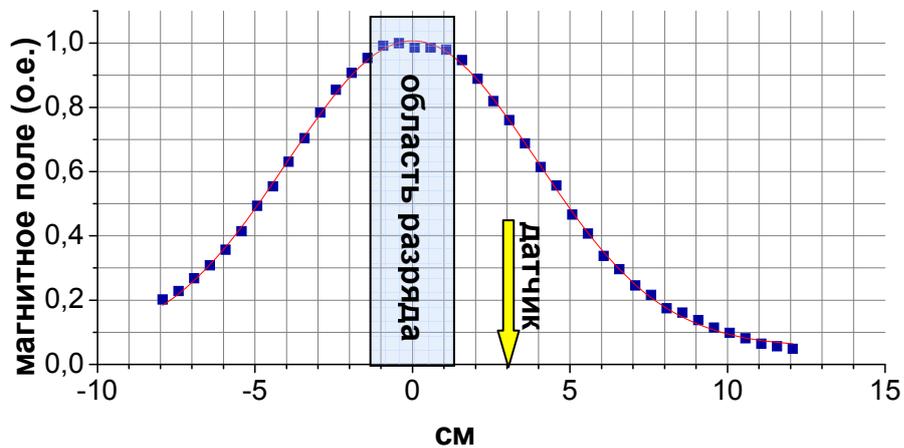


Рис 5. Магнитное поле на оси катушки

Данные измерений распределения поля на оси катушки представлены на рис. 5. Поле катушки пропорционально току в ее обмотке, у нас на 1 А тока получалось 50 Гс в центре катушки. Также на рисунке показана область разряда (почти полностью располагается в постоянном поле) и место, где примерно проводились измерения. Магнитное поле регулировалось от 0 до 1 кГс.

В экспериментах с постоянным током в обмотках возникала проблема перегрева клапана подачи газа и ухудшение его работы из-за нагрева катушки. Поэтому была сделана специальная импульсная схема питания (рис. 6). В ней предусмотрен в некоторый момент обрыв тока и быстрый возврат энергии из катушки в конденсаторы. Такая схема питания обеспечивает минимизацию потерь, а также устраняет проблему перегрева. Данная схема позволяет работать с частотой до 2 Гц.

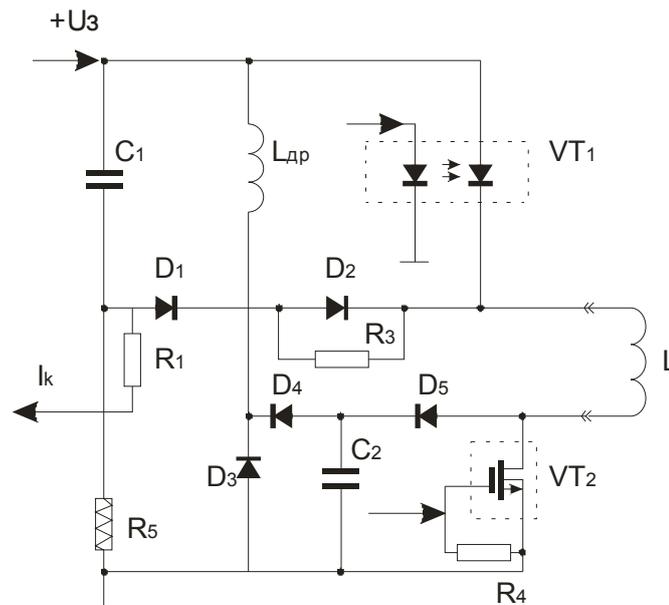


Рис. 6. Схема питания катушки

Схема питания работает следующим образом: конденсатор C_1 заряжается от внешнего источника до U_z , после этого запускается тиристор VT_1 и электронный ключ VT_2 , и конденсатор C_1 начинает разряжаться через катушку L . Когда ток в катушке достигнет максимума и пройдет эксперимент с разрядом, ключ VT_2 выключается, и катушка L быстро заряжает конденсатор C_2 ($C_2 \ll C_1$). После того как ток в катушке достигнет нуля, конденсатор C_2 медленно заряжает конденсатор C_1 . Затем C_1 подзарядается от внешнего источника, и все готово к новому запуску.

5 Схема эксперимента

На рис. 7 изображена упрощенная электрическая схема эксперимента. Анод разряда заземлен, на катод подается отрицательное напряжение двумя источниками. Один источник постоянного напряжения предварительного разряда, другой импульсный источник основного разряда. После импульсного напуска порции водорода в полый катод через клапан подачи газа (давление газа

в катоде по результатам измерений миниатюрной ионизационной лампой составляет 10–20 миллиторр) источником постоянного напряжения формируется слабый разряд с небольшим током ~ 2 А, который создает предварительную ионизацию. Слабый разряд успевает разгореться, и плазма заполняет значительную часть полости катода. После этого значительно облегчается зажигание основного сильноточного разряда импульсным источником. Использование такой двухступенчатой схемы объясняется тем, что в экспериментах без предварительного разряда тлеющий разряд с током свыше 10–20 А получить не удалось из-за частых срывов в дугу. Основной разряд был получен с током до 200 А, напряжением на разряде ≈ 150 В и длительностью около 200 мксек. Образовавшаяся в результате разряда плазма собственным давлением вытесняется через отверстие в катоде, проходит через сетку анода, и образует в заанодном пространстве расширяющуюся плазменную струю.

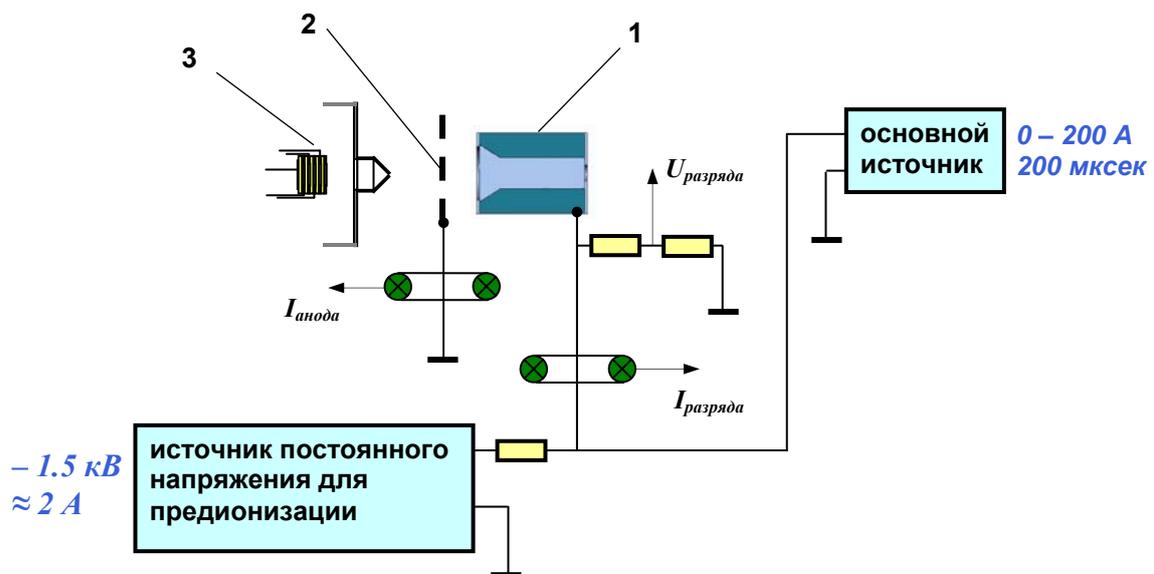


Рис 7. Электрическая схема эксперимента: 1 – полый катод, 2 – анод, 3 – датчик плотности потока электронов

Ток разряда измеряется с помощью пояса Роговского, напряжение на разряде с помощью омического делителя. Также имеется возможность отдельным поясом Роговского измерять ток, идущий только на анод. На небольшом расстоянии от анода разряда расположен датчик плотности потока электронов. Сигналы с поясов, делителя и датчика регистрируются цифровым осциллографом.

6 Четырехсеточный датчик плотности потока электронов

Для измерения профилей эмиссии электронов и спектра электронов, покидающих область разряда, был создан датчик плотности потока электронов. Схема датчика представлена на рис. 8. Датчик представляет собой четырехсеточный анализатор плотности потока заряженных частиц. Установленный на координатном механизме, датчик можно перемещать по всем трем направлениям. Датчик состоит из четырех сеток и коллектора, отделенных друг от друга изоляторами. Со стороны плазмы для уменьшения плотности плазмы в самом датчике расположен экран, на котором помещен конус с коллимирующим отверстием диаметром 0,8 мм. Датчик располагался на расстоянии 2–3 см от анода разряда, чтобы максимально приблизиться к плоскости эмиссии, и вместе с тем, чтобы датчик не мешал визуальному наблюдению разряда. Перемещая датчик поперек плазменного потока, можно получить профили эмиссии плазмы, а, подавая на сетки запирающее напряжение, можно получить спектр электронов.

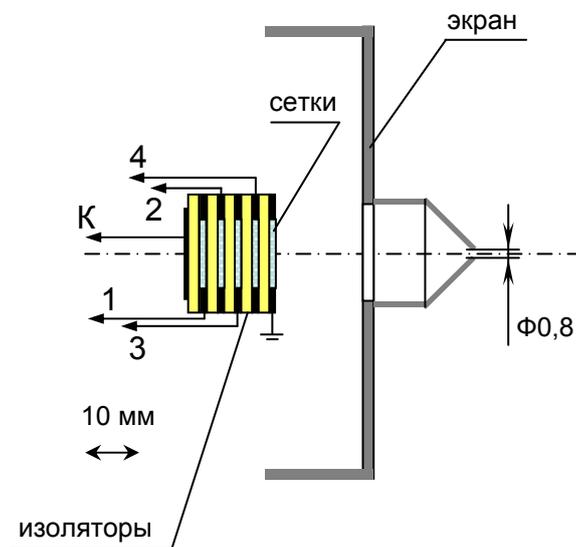


Рис. 8 Четырехсеточный датчик

7 Результаты измерений

7.1 Вольтамперная характеристика

Вольтамперная характеристика разряда, измеренная в магнитном поле 1 кГс, изображена на рис. 9. Аппроксимация прямой выполнена методом наименьших квадратов. Видно, что при изменении тока разряда в широком

диапазоне (от 5 А до 200 А) напряжение на разряде меняется слабо (155 В–140 В). Вольтамперная характеристика получилась линейно-падающей, то есть разряд имеет отрицательный дифференциальный импеданс. Отсюда можно получить требование на генератор, поддерживающий основной разряд: его импеданс должен быть больше импеданса разряда, для того чтобы не провоцировать срывы тлеющего разряда в дугу. Импеданс разряда составляет $\approx 0,8$ Ом, и, следовательно, импеданс источника питания основного разряда – около 8 Ом. Реальный импеданс составил около 7 Ом.

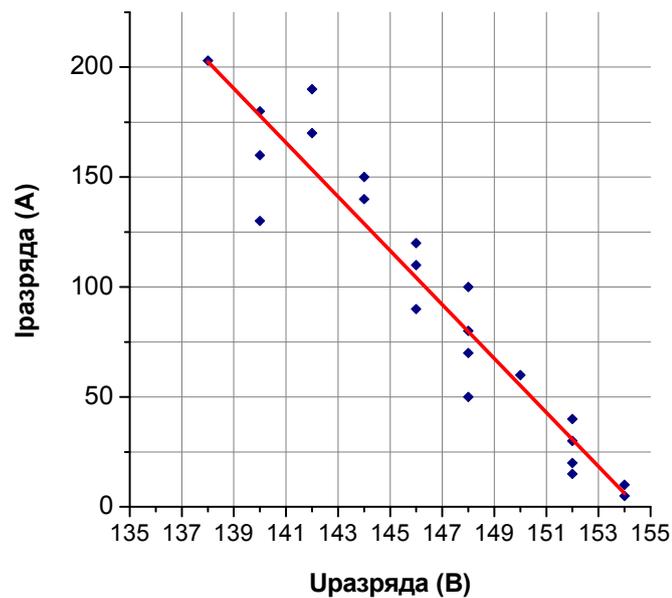


Рис 9. ВАХ (поле 1 кГс)

7.2 Анодный ток

Для того чтобы понять, какая часть полного потока вытекает из источника плазмы, вместе с полным током разряда с помощью дополнительного пояса Роговского измерялся ток идущий только на анод. На следующем рисунке (рис. 10) представлено отношение тока на анод к полному току разряда при разных токах разряда в магнитном поле 1 кГс. Видно, что это отношение постоянно и не зависит от тока разряда. Причем достаточно большая часть потока $\approx 40\%$ вытекает из источника плазмы. Это важно в связи с дальнейшими планами использовать данный источник в качестве плазменного эмиттера.

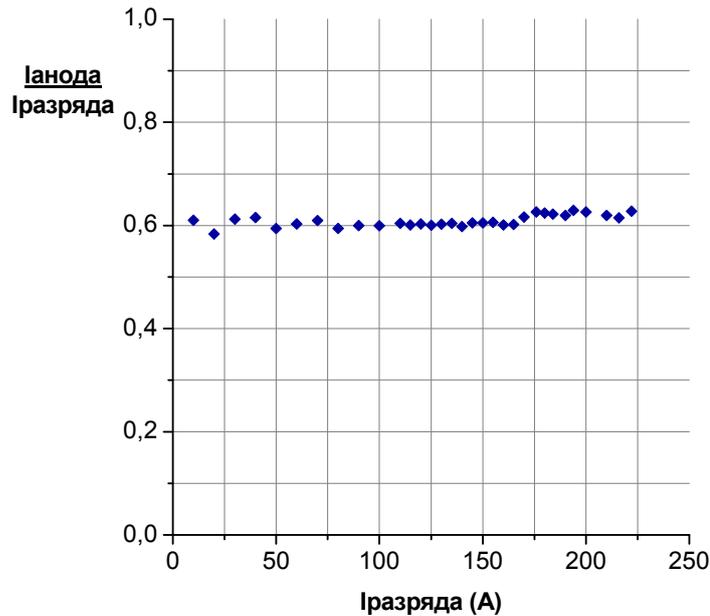


Рис. 10 Ток на анод

7.3 Профили эмиссии плазмы

Регистрация профилей плотности эмиссии плазмы по сечению осуществлялась передвижением четырехсеточного датчика по одной из координат поперек потока плазмы. При этом датчик смещался с помощью координатного механизма с шагом 0,5 мм. Измерение проводилось при разных токах разряда: 10–200 А, и в разном магнитном поле до 1000 Гс. Каждая точка на графике представляет собой результат усреднения по нескольким измерениям. Для более удобного сравнения часть профилей была нормирована.

Чтобы понять, чем отличаются профили эмиссии плазмы дугового разряда и тлеющего разряда в полой катодной трубке, были сделаны отдельные измерения в дуговом режиме разряда. Напряжение на разряде при этом падает до 40–50 В. Сигнал, снимаемый с коллектора, при этом не повторяется как в случае с нормальным разрядом (рис. 11а), амплитуда сигнала от выстрела к выстрелу изменяется в несколько раз (вертикальные полосы на рис. 11б – это диапазон значений, которые принимает сигнал с коллектора). Это согласуется с тем, что положение и перемещение катодного пятна дуги непредсказуемо. Отсюда видно, что плотность потока плазмы из дугового источника может быть локально большой, особенно в сильном магнитном поле, и приводить к пробоям в электронно-оптической системе генератора пучка.

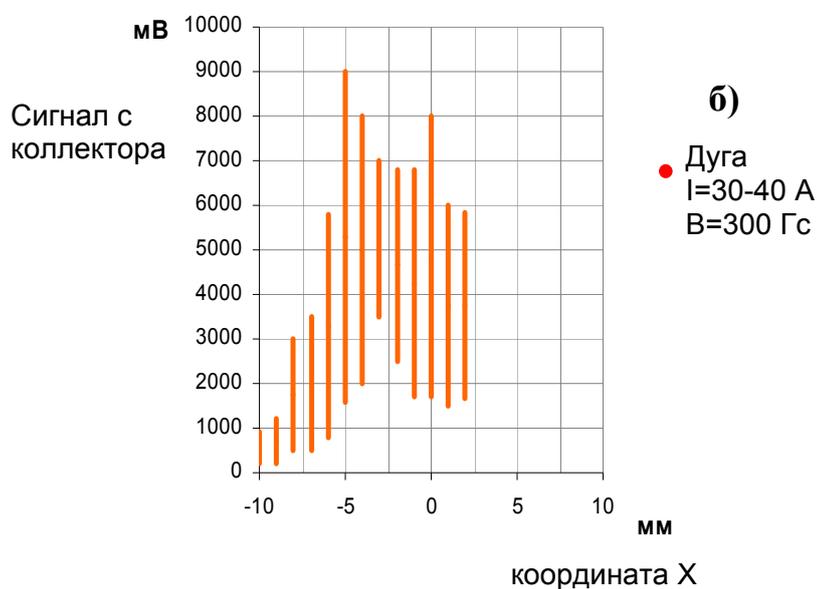
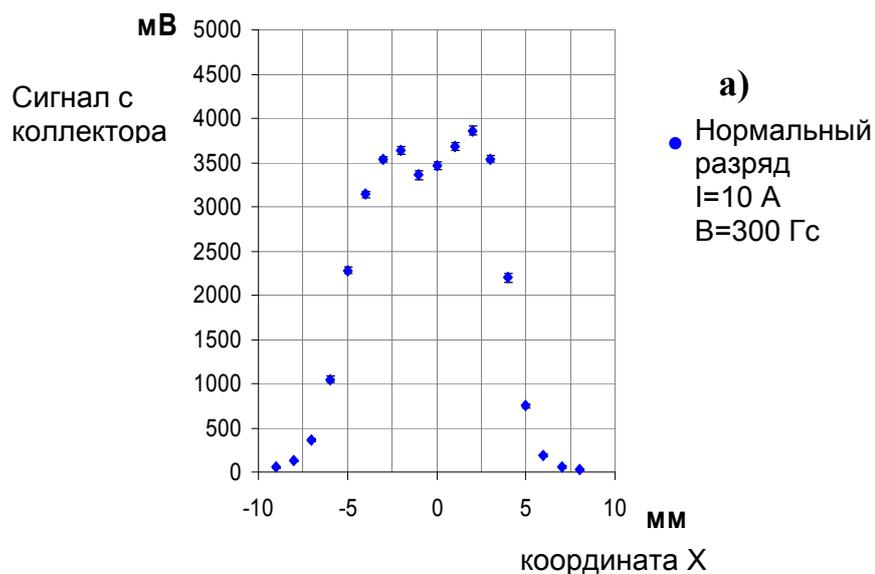


Рис. 11 Профили плотности эмиссии: а) нормального и б) дугового разряда

На рис. 12 представлен профиль плотности эмиссии разряда без магнитного поля, а на рис 13, 14 профили плотности эмиссии при разных токах разряда и в разном магнитном поле. Видно, что нормированные профили почти не зависят от тока разряда, а при увеличении магнитного поля плазменный поток немного сужается.

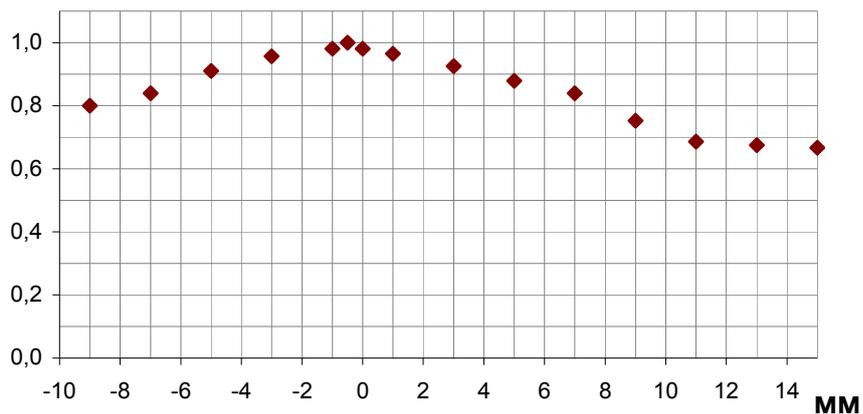
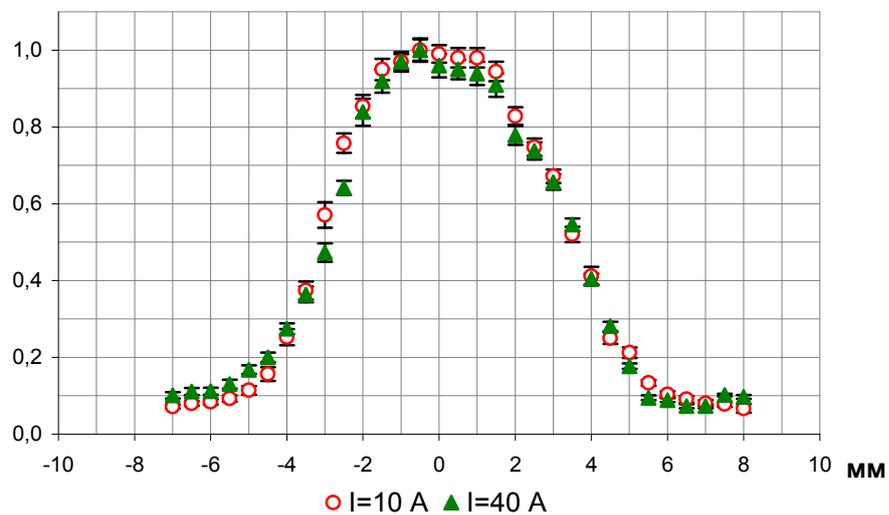


Рис. 12 Профиль плотности эмиссии без магнитного поля

B=1000 Гс



B=1000 Гс

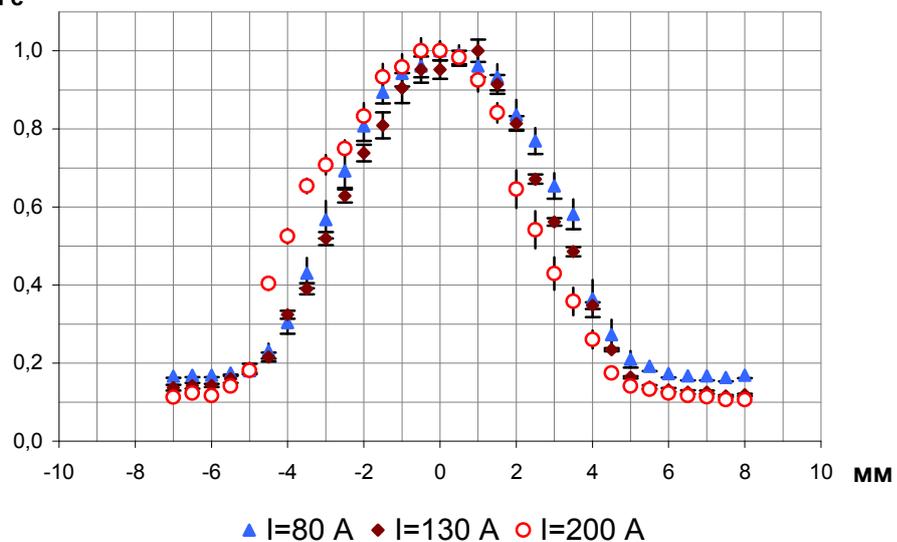


Рис. 13 Профили плотности эмиссии при разных токах разряда

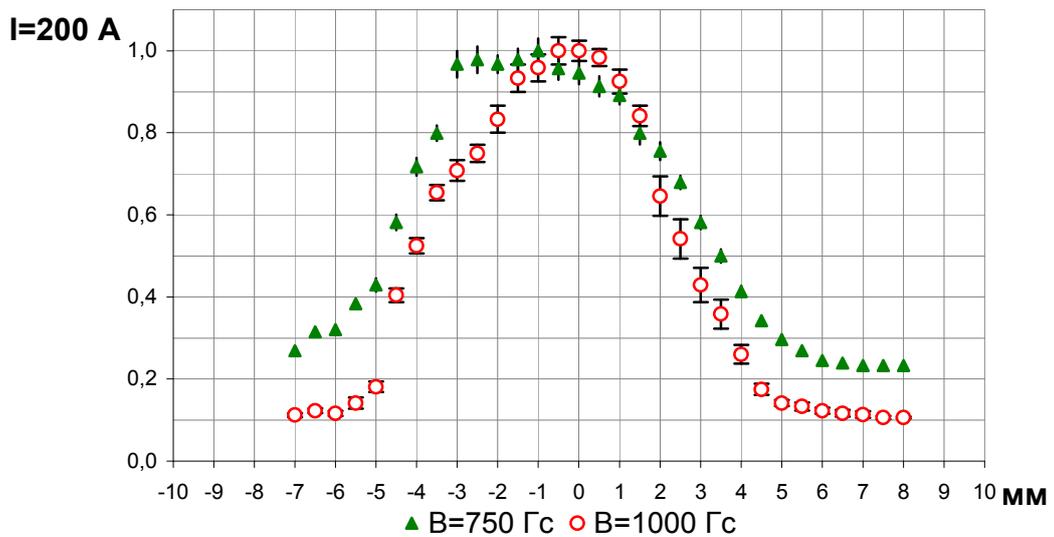
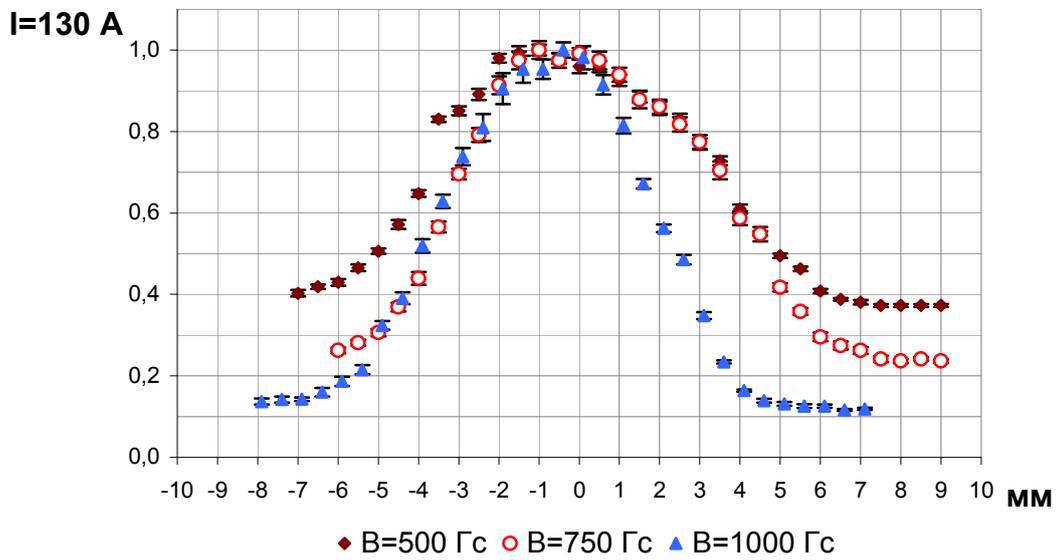
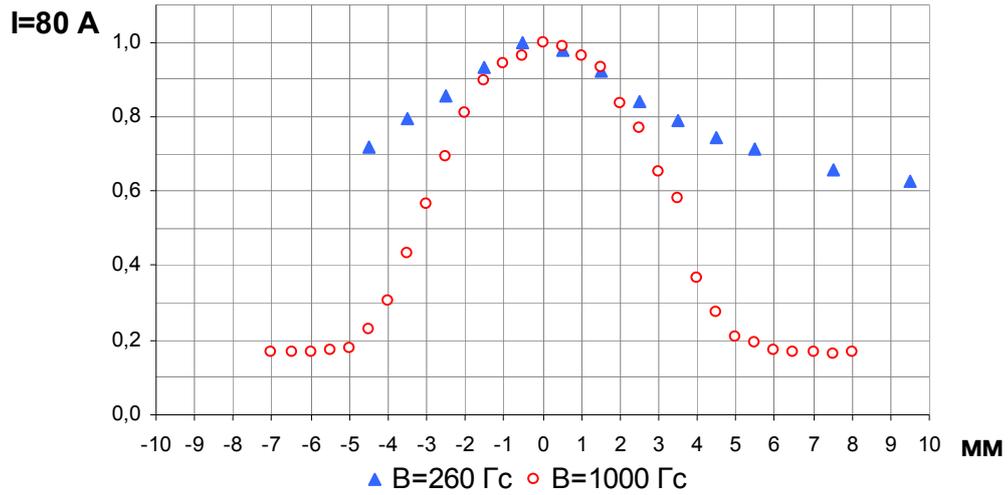


Рис 14 Профили плотности эмиссии в разном магнитном поле

7.4 Спектр электронов

Для измерения спектра электронов, покидающих область тлеющего разряда, на сетку номер 4 четырехсеточного датчика подавалось постоянное вытягивающий потенциал +200 В, а на 2 сетку задерживающий потенциал от 0 до -300 В. Ионы из потока плазмы, сгенерированной в разряде, отражаются от 4 сетки, а электроны проходят через 4 сетку, проходят через 3 сетку с нулевым потенциалом, а дальше часть электронов задерживается потенциалом, создаваемым 2 сеткой. Электроны, обладающие энергией выше, чем величина потенциального барьера, попадают на коллектор детектора. При изменении напряжения, подаваемого на 2 сетку, изменяется число электронов, достигающих коллектора. Сигнал с коллектора регистрируется цифровым осциллографом. Измерения проводились в магнитном поле 1 кГс при разных токах разряда и при разных положениях датчика. Из измеренных зависимостей сигнала с коллектора от задерживающего потенциала дифференцированием были получены спектры электронов. На рис. 15 приведены спектры при токе 130 А в центре потока плазмы ($Y = 0$), на краю ($Y = 9$ мм) и в промежуточном положении ($Y = 4$ мм). На рис. 16 то же самое для тока 190 А. В результате этих измерений было обнаружено, что большая часть электронов покидающих разряд являются высокоэнергичными (с энергией 50–60 эВ и более). Скорее всего, это электроны, ускоренные в прикатодном слое разряда, но потерявшие часть своей энергии при столкновениях в плазме разряда. Также видно, что в центре плазменного потока больше электронов с высокой энергией и больше их средняя энергия, чем на периферии. Это объясняется тем, что мы измеряем только составляющую энергии, соответствующую скорости электронов вдоль магнитного поля, а электроны на периферии вылетают с катода почти под прямым углом к полю. Эта закономерность сохраняется и для тока разряда 190 А, но средняя энергия электронов в центре явно больше, чем для тока 130 А. В центре электроны эмитируются доньшком катода и с увеличением тока разряда доля этих электронов возрастает.

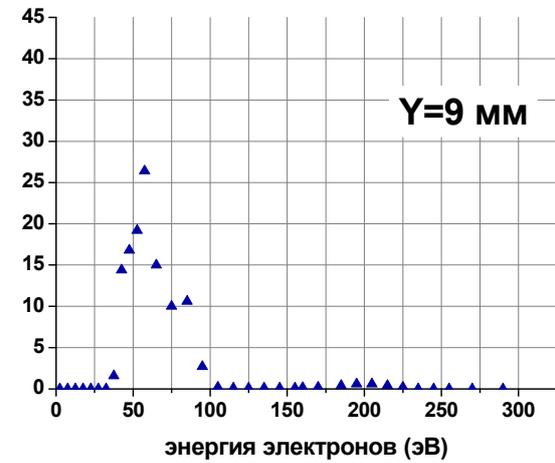
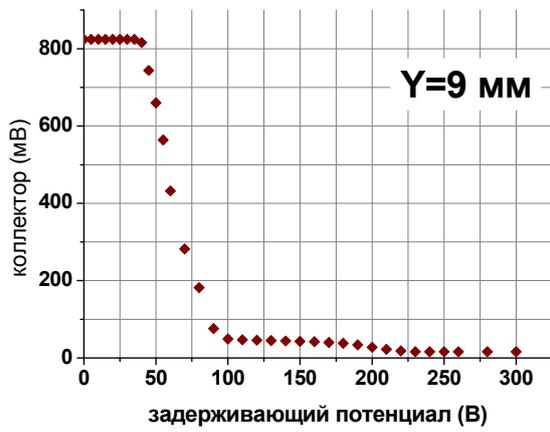
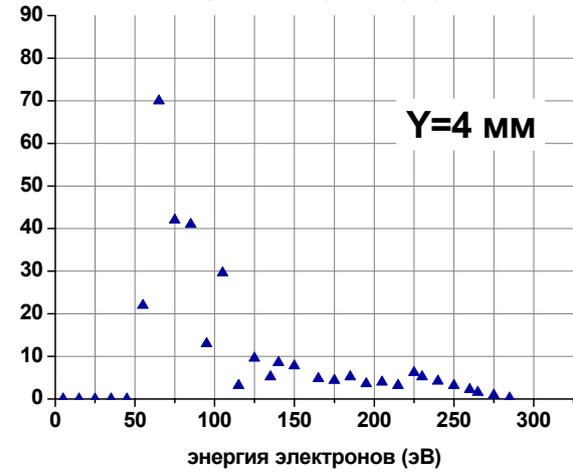
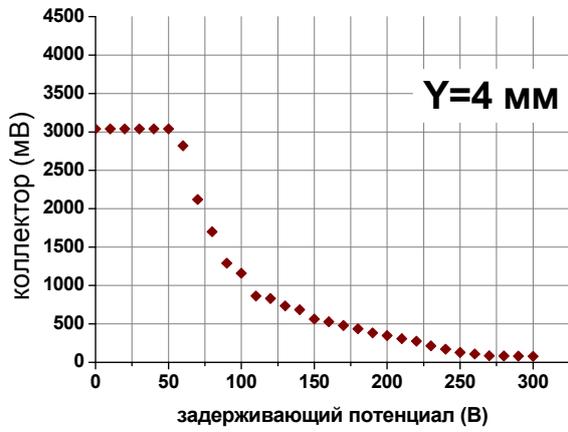
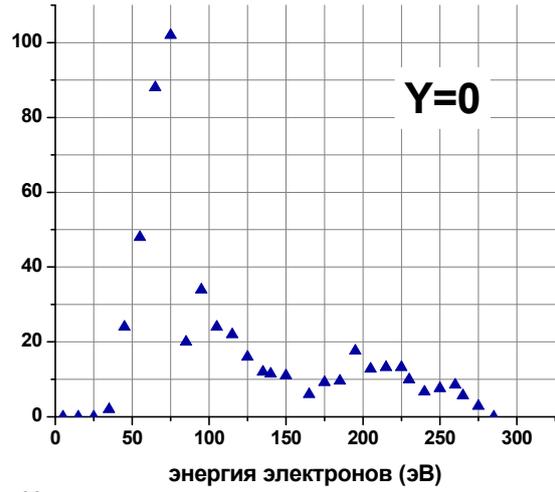
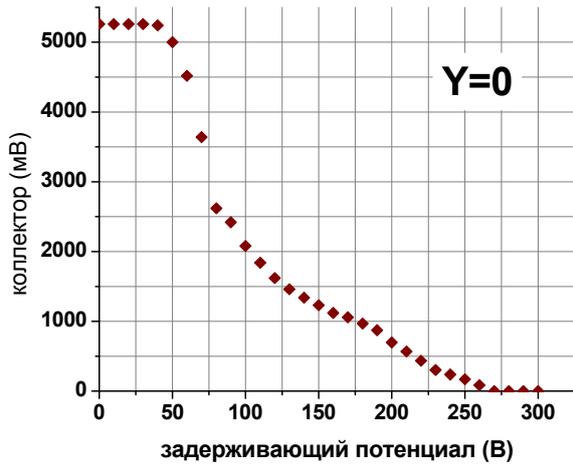


Рис. 15 Спектр электронов (ток разряда 130 А)

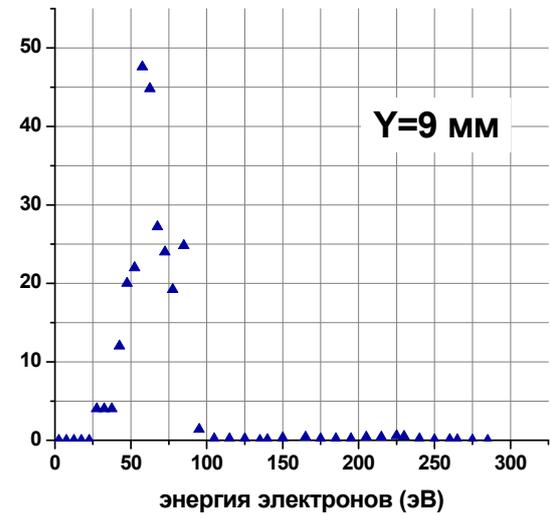
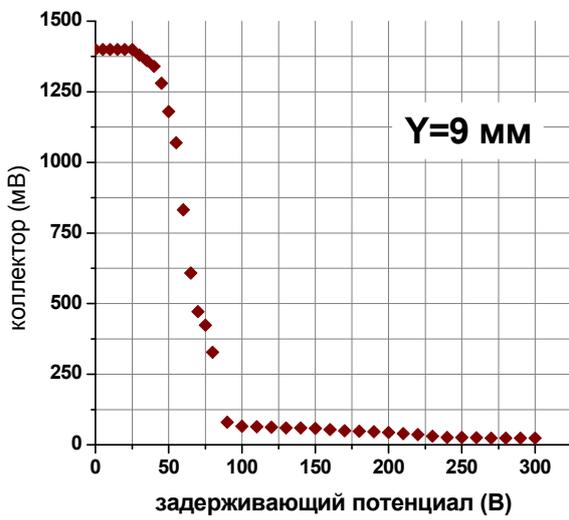
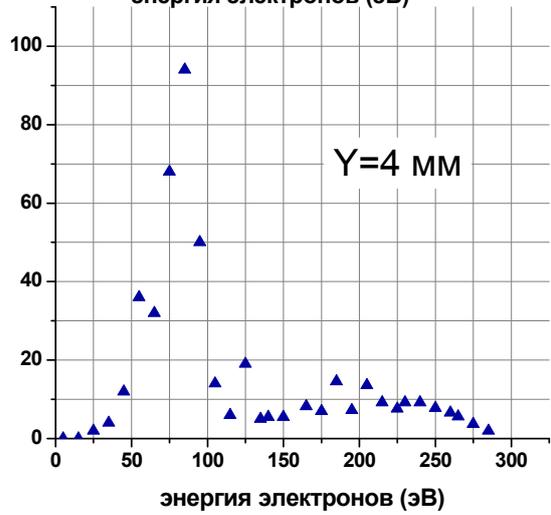
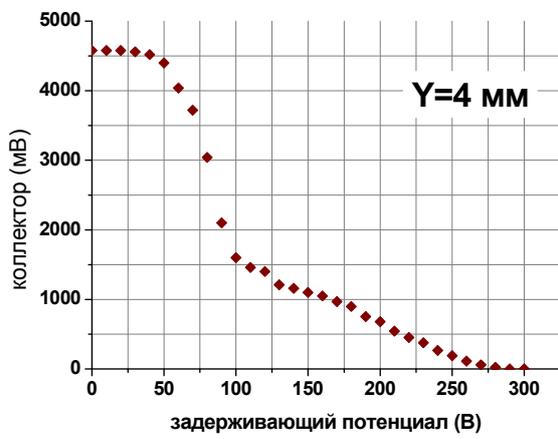
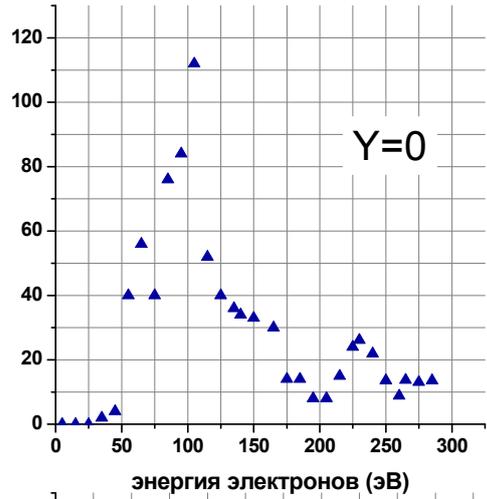
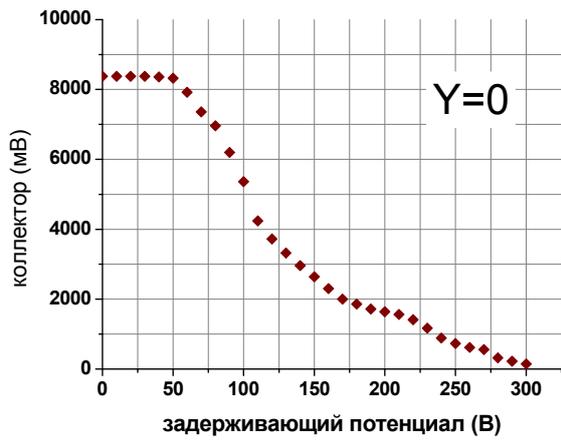


Рис. 16 Спектр электронов (ток разряда 190 А)

8 Заключение

Основными результатами работы является:

- получен сильноточный тлеющий разряд в холодном полом катоде в магнитном поле 1 кГс с током до 200 А напряжением на разряде ≈ 150 В
- измерены профили эмиссии электронов из плазмы тлеющего разряда в полом катоде и в дуговом разряде
- получены экспериментальные подтверждения, что из тлеющего разряда с полым катодом возможно получение сравнительно гладкого профиля эмиссии, в то в то время как в дуговой форме разряда профиль эмиссии очень сильно пикированный и непредсказуем по величине и положению в сечении плазмы
- обнаружено что около 40% плазменного тока вытекает из источника плазмы, что важно в связи с дальнейшими планами использовать данный источник как плазменный эмиттер
- измерен спектр электронов; электроны, покидающие разряд оказались высокоэнергичными, ускоренными в прикатодном слое, но потерявшие часть своей энергии при столкновениях в плазме разряда. По-видимому, это потребует пересмотра современных представлений о формировании пучка с использованием плазменного эмиттера на основе полого катода

Список литературы

- 1) *Yu.I. Belchenko, V.I. Davidenko, G.I. Dimov, et. al., // Rev. Sci. Instrum., Vol. 61, No. 1, p. 378 – 384, 1990.*
- 2) *I.V. Kandaurov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, G.E. Derevyankin, and Yu.A. Trunev. Study of Intensive Long-Pulse Electron Beam Generation in a Source with Arc Plasma Emitter Operated in a External Magnetic Field. // Proceedings of 15th International Symposium on High Current Electronics: Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, p.121-124, 2008.*
- 3) *Ю.П. Райзер, «Физика газового разряда» // М.: Наука, 1992.*
- 4) *И.Н. Мешков, Б.В. Чириков, «Электромагнитное поле», Ч.1 // Новосибирск: Наука, 1987.*
- 5) *Под ред. Я. Брауна, «Физика и технология источников ионов» // М.: Мир, 1998.*
- 6) *Б.И. Москалев, «Разряд с полым катодом» // Энергия, 1969.*
- 7) *С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков, «Основы физических процессов в плазме и плазменных установках» // М., 2000.*
- 8) *Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.П. Никонов, «Термоэмиссионные катоды» // М.: Энергия, 1966.*
- 9) *Т.Б. Фогельсон, Л.Н. Бреусова, Л.Н. Вагин, «Импульсные водородные тиратроны» // М.: Советское радио, 1974.*
- 10) *Е.М. Окс, «Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения» // Томск: Издательство НТЛ, 2005.*
- 11) *Б.А. Князев, «Низкотемпературная плазма и газовый разряд» // Новосибирск, 2003.*