

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)**

Физический факультет

Выпускная квалификационная бакалаврская работа

Кафедра физики плазмы

Перепелкин Леонид Павлович

Название работы:

**Измерение пространственных и угловых характеристик мощного электронного пучка
субмиллисекундной длительности**

Научный руководитель:

Куркучеков Виктор Викторович

Новосибирск 2015 год

Оглавление

Введение.....	2
Источник мощного электронного пучка субмиллисекундной длительности	2
Обзор методов.....	7
Реализация диагностики	11
Экспериментальные результаты и их обсуждение	17
Заключение.....	31
Список литературы.....	31

Введение

Мощные (~ 10 МВт) низко- и среднеэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности находят применение в различных областях науки и техники. В ИЯФ СО РАН разработан источник электронного пучка на базе дугового плазменного эмиттера и многоапертурной диодной электронно-оптической системы со следующими параметрами: энергия электронов до 100 кэВ, ток пучка до нескольких сотен ампер при длительности импульса до 1 мс. Такой пучок используется в экспериментах по нагреву и стабилизации плазмы в открытых ловушках, генерации миллиметрового и субмиллиметрового излучения в пучково-плазменных устройствах, а также в материаловедческих исследованиях в интересах программы ITER.

Прогресс в области удержания и нагрева плазмы в токамаках выявил актуальную, на сегодняшний день, проблему - стойкости материалов первой стенки и дивертора при мощных термических нагрузках. Воздействие на мишень потока электронов позволяет проводить физическое моделирование нагрузки на элементы будущих токамаков-реакторов во время быстрых переходных процессов в плазме (типа ELM-событий). С этой целью в ИЯФ СО РАН был создан экспериментальный стенд, включающий модуль со сменными мишенями, набор диагностик, таких как система лазерного рассеяния, быстрая фотокамера, источник электронного пучка на базе дугового плазменного эмиттера и многоапертурной диодной электронно-оптической системы. Для достижения необходимой плотности энергии на мишени предполагается сжатие пучка электронов внешним магнитным полем до 100 раз, что налагает определённые требования на угловые характеристики электронного пучка – питч- угол не должен превышать 100 мрад.

Таким образом, для дальнейших исследований стойкости материалов первой стенки и дивертора при мощных термических нагрузках необходимо создать диагностику, способную измерить угловые характеристики мощного пучка электронов.

Источник мощного электронного пучка субмиллисекундной длительности

В данной работе использовался источник электронного пучка с дуговым плазменным эмиттером и многоапертурной электронно-оптической системой (ЭОС), разработанный в ИЯФ СО РАН. Данный источник включает в себя непосредственно инжектор электронного пучка, систему питания, магнитную систему, систему тренировки

ускоряющего зазора, систему газонапуска и измерительные цепи. Схема источника электронного пучка представлена на рис. 1.

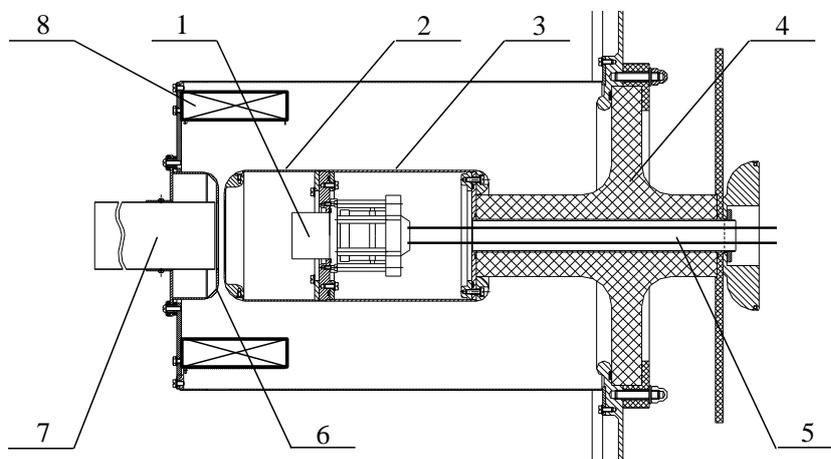


Рис.1. Схема инжектора пучка. 1- дуговой генератор плазмы, 2- плазменный экспандер (полый анод дуги) с эмиссионным электродом, 3- высоковольтный электрод, 4- высоковольтный изолятор, 5- кабели питания дугового генератора и трубка подвода газа, 6- вытягивающий электрод (анод диода), 7- труба дрейфа, 8- катушка магнитного поля.

Для создания эмиссионной плазмы используется импульсный генератор дугового разряда с холодным катодом. В качестве рабочего газа используется водород, напускающийся быстрым электромагнитным клапаном через отверстие в катоду дугового генератора. После напуска газа в канале дуги зажигается разряд, создающий плотную эмиссионную плазму. Инициация дуги облегчается с помощью вспомогательного разряда между катодом и поджигающим электродом. Канал дуги представлен набором медных шайб под плавающим потенциалом с анодным соплом на конце. Анодное сопло генератора соединялось через сопротивление 10 Ом с экспандером плазмы (2), который являлся основным анодом дугового разряда. К моменту включения дуги (через 350 – 400 мкс после подачи питания на клапан) существует перепад давления рабочего газа на несколько порядков величины между дуговым каналом и полостью экспандера. Продольное магнитное поле ~ 0.1 Т в канале дуги создается катушкой магнитной изоляции и способствует лучшему горению разряда на экспандер. Торцевой экспандер с запрессованной в него решёткой ЭОС является эмиссионным электродом. Высоковольтный электрод (3) располагается на проходном высоковольтном изоляторе из

оргстекла (4). Кабели питания дугового генератора и трубка подачи водорода (5) располагаются внутри металлической трубы, проходящей сквозь изолятор.

Для формирования пучка использовалась многоапертурная диодная ЭОС, катодный и анодный электроды которой представляют собой «решетки» с 499 отверстиями, просверленным в гексагональном порядке. Отверстия выставлены соосно с хорошей точностью при сборке диода. Диаметр отверстий на катоде и на аноде 2.4 мм и 4.4 мм соответственно, зазор диода составлял 12 мм, прозрачность электродов составляет 20%.

Вытягивание и ускорение электронов осуществляется при помощи анода (6) диода, находящегося под потенциалом земли. Анод и катод показаны на рис. 2. Пройдя через отверстия в аноде, пучок проходит по трубе дрейфа (7). Для тренировки источника с магнитным полем, без включения магнитной системы всей установки ГОЛ-3, в корпусе источника пучка установлена собственная катушка магнитного поля (8).



Рис.2: Внешний вид катода и анода ЭОС

Импульс ускоряющего напряжения создаётся с помощью частичной разрядки высоковольтной ёмкости, которая коммутируется на источник многоазорным воздушным разрядником. Для формирования заднего фронта импульса и защиты ускоряющих электродов при пробоях источника используется срезающий (кромбарный) разрядник также многоазорного типа. Для зарядки высоковольтной емкости используется высокочастотный компактный источник, разработанный в ИЯФ СО РАН [1].

Данный источник позволяет получать электронные пучки с током до 250 А длительностью до 1 мс при ускоряющем напряжении до 100 кВ. При этом, диаметр выходного пучка оставляет ~ 180 мм. На рис. 3 показана типичная осциллограмма

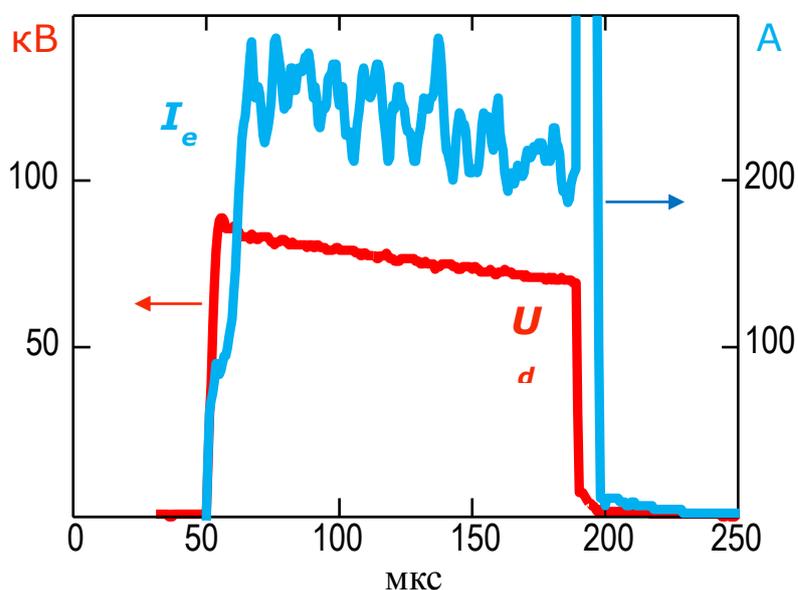


Рис.3: Типичные осциллограммы выстрелов источника электронного пучка. Синий сигнал – ток пучка, красный сигнал – ускоряющее напряжение.

импульса тока пучка (синим) и ускоряющего напряжения (красным).

Описанный источник был установлен в экспериментальный стенд, созданный для моделирования воздействия на материалы мощных потоков тепла. Данный стенд представляет собой участок многопробочного соленоида и оконечный бак установки ГОЛ-3. На рис. 4 показана схема стенда с установленным источником пучка электронов.

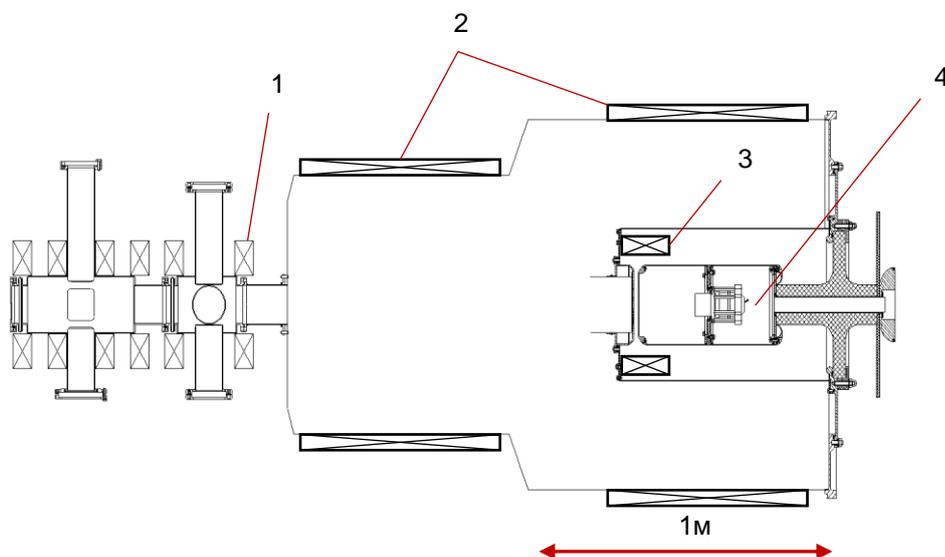


Рис.4: Схема установки источника: 1 – многопробочная секция, 2 – катушки концевого бака ГОЛ-3, 3 – катушки магнитного поля источника, 4 – источник электронного.

При этом электронный пучок транспортируется в сходящемся магнитном поле, создаваемом катушками окончного бака (2) и катушками многопробочной секции (1).

Ранее были проведены эксперименты по измерению профиля плотности тока пучка на металлической мишени, методы и результаты данных измерений приведены в

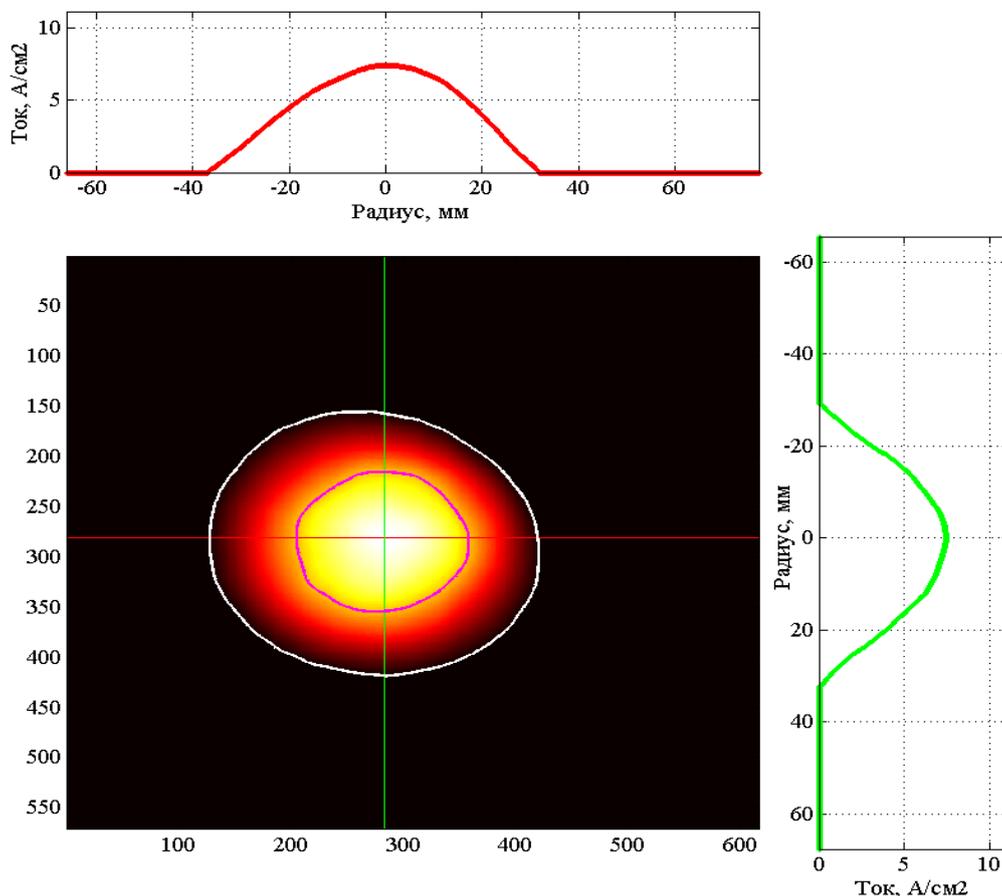


Рис.5: Типичный профиль плотности тока на мишени исследуемого пучка, полученный в одном из экспериментов с рентгеновской камерой-обскурой

[2]. Пример получаемого профиля плотности тока показан на рис. 5.

Красной и зеленой кривыми на рисунке обозначены профили плотности тока в соответствующих сечениях. Полученные распределения плотности тока позволяют сформулировать некоторые следствия. Во-первых, в различных импульсах при фиксированных параметрах эксперимента (внешние магнитные поля, параметры пучка) форма и положение отпечатка пучка не является строго постоянной. Во-вторых, распределение плотности тока пучка на мишени существенно неоднородно, что дает повод предположить о неоднородности плотности тока эмиссии электронов из плазменной границы на катоде, которая, в свою очередь, приводит к неоднородности

угловых характеристик за счет изменения кривизны эмиссионной поверхности. В общем случае данный эффект можно пояснить, используя закон трех вторых для плоского диода. Плотность тока в плоском диоде задается формулой

$$j \sim \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2}, \quad (1)$$

где U – напряжение между электродами, d – расстояние между электродами. Видно, что уменьшение тока при неизменной напряженности электрического поля в зазоре должно сопровождаться увеличением расстояния между электродами. В нашем случае анод является статичным электродом ЭОС, а катод – подвижная поверхность эмиссионной плазмы в отверстии высоковольтного электрода ЭОС. В данном случае увеличение расстояния между электродами обозначает изменение положения и геометрии эмиссионной границы плазмы, а значит и изменение углов эмитируемых электронов.

Исходя из приведённых параметров пучка, можно сформулировать требования к будущей диагностике угловых характеристик. Данная диагностика должна выдерживать мощный (до 10 МВт) поток электронов. При этом необходимо измерять и пространственные (положение пучка, распределение плотности тока), и угловые характеристики пучка в одном импульсе.

Обзор методов

Существуют различные методы измерения угловых характеристик пучка электронов, успешно применяемые на различных установках. Простейшим методом для измерения угловых характеристик электронов является сочетание магнитной пробки и токоизмерительной диагностики. При этом регистрируется ток прошедших через магнитную пробку (область с высоким магнитным полем, создаваемая соленоидом) электронов. Как известно, в адиабатическом приближении максимальный угол электронов - θ_{max} способных преодолеть магнитную пробку составляет:

$$\sin \theta_{max} = \sqrt{\frac{B_0}{B_{max}}}, \quad (2)$$

где B_0 – магнитное поле в области источника, B_{max} – максимальное магнитное поле. Таким образом, варьируя пробочное соотношение и измеряя прошедший ток, можно получить угловое распределение электронов в пучке. Несомненные достоинства рассмотренной диагностики – простота, высокая надежность и способность измерять угловые характеристики высокоэнергетических (до нескольких ГэВ) пучков и пучков с

большими токами [3], а также возможность получить временную зависимость угловых характеристик. Однако, данный тип диагностик не позволяет получить угловое распределение электронов за один импульс, а также не позволяет измерять зависимость угловых характеристик от координаты сечения пучка. К тому же электроны, отраженные от области с сильным магнитным полем, могут оказывать существенное влияние на работу источника пучка.

Для измерения прошедшего тока возможно использовать различные диагностики, например, цилиндр Фарадея или пояс Роговского. Цилиндр Фарадея – приёмник пучка, электрически изолированный от установки и соединенный с землей через амперметр. Форма цилиндра Фарадея должна обеспечивать минимизацию зарядовых потерь за счет отражения электронов и образования плазмы. Преимущество цилиндра Фарадея – высокая точность измерения тока и простота конструкции. Таким образом, возможно обеспечить высокую точность измерения угловых характеристик пучка при условии высокой точности измерения пробочного отношения. Пояс Роговского – измерительный трансформатор тока, выполненный в виде замкнутого соленоида тороидальной формы с равномерной намоткой, один из выводов которой приведён к другому через ось соленоида. Пояс Роговского позволяет измерять ток, протекающий вдоль оси тора, без непосредственного контакта с токоведущими элементами.

Другим, сравнительно простым, методом измерения угловых характеристик пучка электронов является использование многоколлекторного датчика. Данный класс датчиков позволяет получить угловое распределение электронов в конкретной точке сечения пучка с временным разрешением. При этом, электронный пучок транспортируется на маску, которая формирует пучок небольшого диаметра, далее полученный пучок транспортируется на некоторое расстояние, пространственно уширяясь за счёт поперечных скоростей электронов, и принимается на набор коллекторов, обычно представленных набором радиальных приёмников пучка, вложенных друг в друга. При этом, если пучок транспортируется во внешнем магнитном поле, расстояние от отверстия маски до коллекторов пучка должны быть много меньше шага ларморовской спирали

$$\lambda = V_e \frac{2\pi}{\Omega}, \quad (3)$$

где V_e – скорость электронов, Ω – ларморовская частота электронов. В этом случае траектории электронов можно считать баллистическими. Регистрируя ток, пришедший на каждый из коллекторов, возможно получить дискретное угловое распределение электронов в пучке. Преимущество данной схемы – возможность получить зависимость

угловых характеристик от времени. Однако при диагностировании мощных пучков проявляется ряд проблем. В частности, из-за открытой формы коллекторов возможно отражение электронов с коллектора на коллектор, а также межколлекторные токи плазменной природы. К тому-же угловое разрешение данной диагностики невысоко и ограничено количеством коллекторов. Увеличение количества коллекторов при этом усиливает влияние плазменных эффектов и эффектов отражения. Также плазменные эффекты усиливаются при повышении мощности пучка. Описание реализации данной диагностики приведено в статье [4]. Существуют различные вариации данной диагностики с изменением формы коллекторов. Данный метод в отличие от метода магнитная пробка-измеритель тока дает распределение не во всем пучке, а в небольшой области отверстия маски. Однако, для измерения зависимости угловых характеристик от координаты сечения пучка возможно использовать набор датчиков, либо реализовать перемещение зонда в плоскости перпендикулярной оси пучка. В случае перемещаемого зонда возможно обеспечить хорошее пространственное разрешение - порядка диаметра отверстия маски, однако, измерения для различных точек сечения пучка будут произведены в разных импульсах пучка электронов, поэтому применение целесообразно только для источников, угловые характеристики которых незначительно меняется от выстрела к выстрелу. В случае же массива датчиков возможно получение зависимости угловых характеристик от координаты в одном импульсе, но такая диагностика будет иметь низкое пространственное разрешение и высокую сложность.

Для получения зависимости угловых характеристик от координаты в одном импульсе возможно использование “*repper rot*”. В данном методе электронный пучок транспортируется на маску с набором отверстий, формирующими бимлеты небольшого диаметра. При дальнейшей транспортировке данные бимлеты приобретают пространственное уширение и смещение за счёт поперечных скоростей электронов. Попадая на люминофор, электроны вызывают его свечение в видимом диапазоне. По профилю интенсивности свечения для каждого бимлета можно оценить его угловые характеристики. Для слабых пучков возможно усиление свечения люминофора путем помещения перед ним микроканальной пластины. Таким образом измеряются угловые характеристики сразу во многих точках пучка. Реализация данной диагностики описана в статье [5]. Такая диагностика может обеспечить высокое угловое разрешение и приемлемое пространственное. Помимо этого, данная диагностика в одном выстреле вместе с определением угловых характеристик пучка позволяет получить также профиль

плотности тока электронов. Однако, использование данной диагностики для пучков большой мощности затруднено, ввиду интенсивного разрушения люминофора.

Для измерения угловых характеристик пучка также существует диагностика, основанная на черенковом излучении. Электронный пучок транспортируется на маску с несколькими отверстиями, формирующими пучки небольшого диаметра. Далее пучки транспортируются на пластинку из диэлектрика, в которой при условии превышения скоростью электрона скорости распространения света в материале $V = \frac{c}{n}$ образуется излучение Вавилова-Черенкова. Область попадания в пластинку электронов с одинаковым углом к продольной оси представляет из себя окружность радиуса

$$R = r_L \sqrt{2 \left(1 - \cos \left(\frac{\Omega l}{V} \right) \right)}, \quad (4)$$

где r_L – ларморовский радиус, Ω – циклотронная частота, l – пролетное расстояние, V – продольная скорость электронов. Таким образом, электроны высвечивают на пластинке профиль, являющийся наложением окружностей, отвечающих различным углам, с соответствующими интенсивностями. Свечение регистрируется оптической системой с фотокамерой. Данный метод обладает невысоким пространственным разрешением, а также требует высоких энергий пучка (для стекла $n = 1.45$ критическая энергия порядка 190 кэВ [6], в то время как энергия электронов на имеющейся установке около 100 кэВ). При использовании данной диагностики с мощным электронным пучком будет происходить интенсивное разрушение диэлектрика.

Достаточно интересный метод измерения угловых характеристик был предложен в статье [7]. В электронный пучок вводился прут из оргстекла. Электроны, летящие под определенным углом, попадая на прут, эффективно повреждают его только в местах, где их скорость имеет небольшое отклонение от нормали поверхности. Таким образом, мы получаем угловые характеристики на всей длине прута, оценивая его повреждения после прохода пучка. Данный метод имеет низкое угловое разрешение и в первую очередь интересен простотой реализации, такой метод можно быстро и с низкими затратами реализовать для того, чтобы оценить угловые характеристики имеющегося пучка.

Для пучка электронов с параметрами: ток пучка до 250 А длительностью до 1 мс при ускоряющем напряжении до 100 кВ, диаметр пучка 80 мм, стояла задача создать диагностику, способную измерить угловые и пространственные характеристик пучка в одном импульсе. Диагностика с вариацией пробочного отношения и измерением прошедшего тока не позволяет получить пространственную зависимость углового

распределение электронов пучка в одном импульсе, а также не дает представления о его пространственных характеристиках. Многоколлекторный датчик не подходит для пучков большой мощности, а также является относительно сложной диагностикой, требующей множество измерительных каналов (массив датчиков), либо не позволяет измерить пространственную зависимость угловых характеристик пучка в одном импульсе (перемещающийся зонд). Диагностика на основе черенковского излучения требует более высоких энергий электронов, высокая мощность пучка приведет к разрушению диэлектрика-приемника пучка. К тому же, как показал опыт, облучение диэлектрика мощным электронным пучком приводит к загрязнению его ЭОС молекулами диэлектрика и ухудшению электрической прочности ускоряющего зазора.

Учитывая все вышесказанное, было принято решение создать диагностику на базе методики “pepper pot”. При этом бимлеты транспортируются на металлическую пластину – конвертор. Конвертор обеспечивает преобразование энергии электронов в излучение рентгеновского диапазона и защищает люминофор от разрушающего воздействия электронного пучка, что дает возможность использовать такую диагностику для пучков с большими токами. Данная диагностика обеспечивает приемлемое разрешение при измерении угловых характеристик и позволяет получить их пространственную зависимость в одном импульсе.

Реализация диагностики

Принципиальная схема созданной на основе метода “pepper pot” диагностики

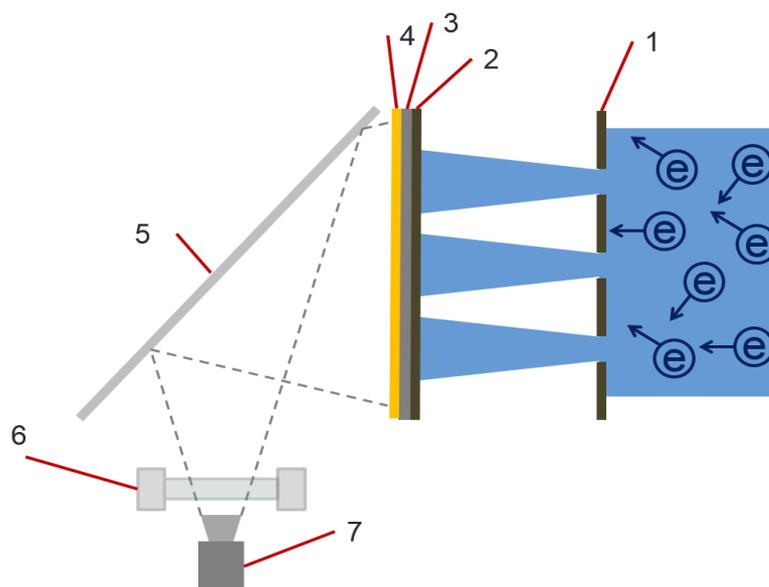


Рис.6: Схема диагностики “pepper pot”: 1 – маска, 2 – конвертор, 3 – теплоизолирующий слой, 4 – люминофор, 5 – зеркало, 6 – вакуумное окно, 7 – камера

показана на рис. 6.

Электронный пучок транспортируется на маску (1), где из него вырезаются отдельные бимлеты. Далее бимлеты транспортируются на конвертор (2), приобретая пространственное уширение за счет поперечных скоростей электронов. При этом влиянием собственного объёмного заряда можно пренебречь ввиду малого диаметра каждого бимлета. Рентгеновское, тормозное и характеристическое, излучение, возникающее при взаимодействии материала конвертора с электронами бимлетов, проходит через тонкий теплоизолирующий слой (3) и попадает на люминофор (4). Видимое свечение люминофора фиксируется при помощи зеркала (5) и быстрой ПЗС-камеры SDU-285 (6), находящейся вне вакуумного объема. Разрешение кадра 1392x1032 пкс, время экспозиции 5 мкс-4.5 мин

Ввиду того, что на маску приходится большая часть тока пучка, она должна быть способна выдерживать поток электронов мощностью до 10 МВт. В связи с этим в качестве материала маски необходимо использовать тугоплавкий материал достаточной толщины. В нашем случае, в качестве материала маски был использован молибден толщиной 800 мкм. В свою очередь, для обеспечения наилучшего углового разрешения отверстия маски должны быть как можно меньшего диаметра. Однако, уменьшение диаметра отверстий при имеющейся толщине маски приводит к увеличению влияния боковых образующих отверстий на траектории проходящих электронов. С учетом толщины пластины – маски (800 мкм) диаметр отверстий был выбран 2 мм. Данный диаметр обеспечивает достаточное разрешение и в тоже время минимально изменяет угловое распределение.

Отверстия располагались в вершинах квадратной сетки с шагом 13 мм. Всего отверстий



Рис.7: внешний вид молибденовой маски

было 169 штук. Внешний вид маски показан на рис. 7.

В качестве оценки влияния боковых образующих отверстия на угловые характеристики бимлета, на рис. 8 был рассмотрен случай, когда все электроны имеют угол 100 мрад и их поперечные скорости перпендикулярны стенке и направлены от центра отверстия. Из поглощенных на стенке электронов наибольшее начальное расстояние от стенки будут иметь электроны, которые попадут в самый нижний край стенки. Таким образом, радиус окружности, находясь внутри которой в момент влета в отверстие электроны не попадут на стенку, равен $r=0.92$ мм. Следовательно, на стенках поглощается около $1 - \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \sim 15\%$ таких электронов. Если учесть, что распределение по поперечным скоростям достаточно изотропно, то оценку сверху даст модель, где поперечные скорости электронов также перпендикулярны стенке, но половина из них направлена к центру отверстия, а половина от него, то есть число поглощенных электронов снизится вдвое – до 7.5%. Если учесть еще и отражение электронов от стенки с коэффициентом $\eta=0.375$ (согласно статье [8]), то умножив 7.5% на $(1 - \eta)$ получаем оценку сверху поглощенных

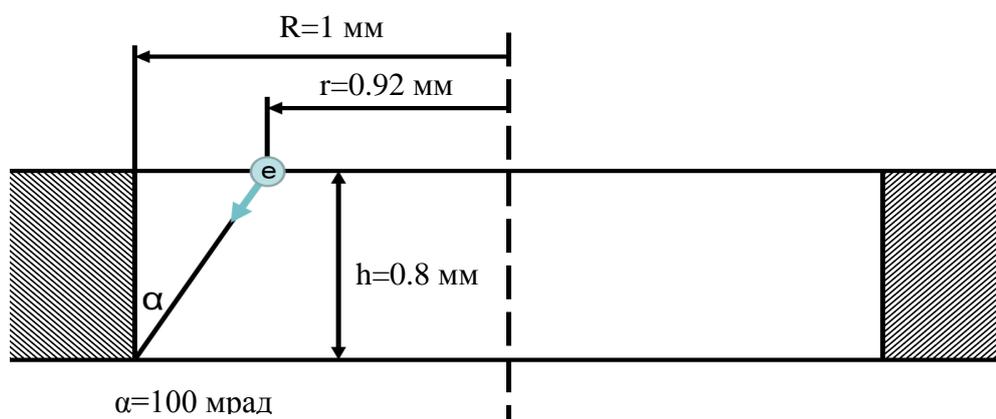


Рис.8: Геометрия столкновения электронов с углом 100 мрад со стенкой

электронов $\sim 4\%$.

При падении на поверхность маски электронного пучка с энергией до 100кэВ возникает рентгеновское излучение (тормозное и характеристическое), имеющее практически изотропное распределение. Данное излучение может приводить к паразитной засветке люминофора. Таким образом, важным свойством маски является её непрозрачность для этого излучения. Для оценки доли рентгеновского излучения, проходящего сквозь тело маски, был выполнен расчёт спектра молибдена при падении на него под нормальным углом электронного пучка с током 100 А, энергией частиц 80 кэВ и длительностью импульса 100 мкс. При расчётах спектра использовалась численная модель, описанная в [8]. Результаты данных расчётов показаны на рис. 9, красная кривая соответствует спектру молибдена, синяя кривая – коэффициент пропускания молибдена,

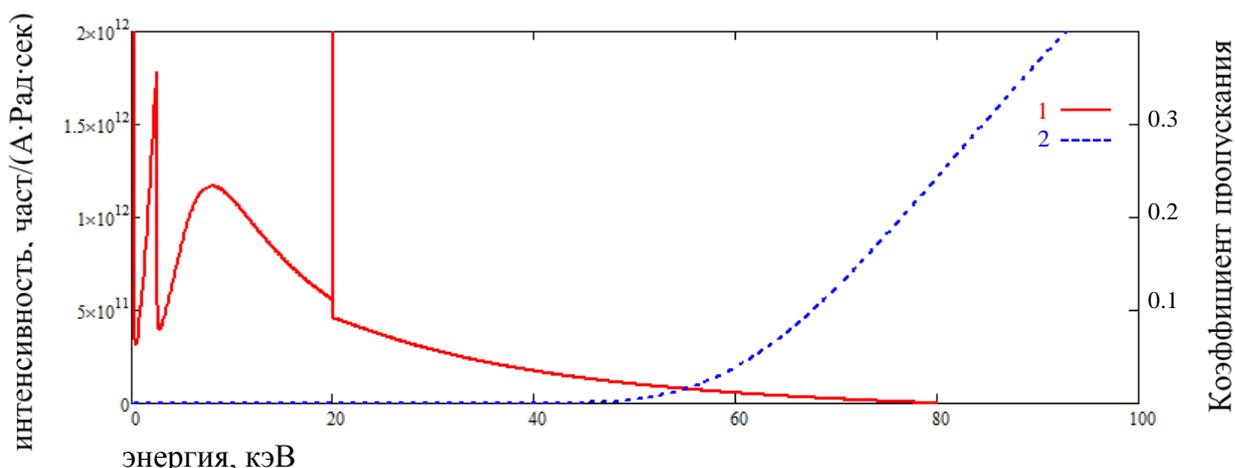


Рис.9: спектр излучения молибдена при бомбардировке электронами(1) и коэффициент поглощения молибдена толщиной 800 мкм(2)

рассчитанный на основе данных NIST.

Свёртка этих кривых показывает, что доля энергии прошедшего сквозь тело маски рентгеновского излучения составляет 0.1 % от энергии всего спектра. Таким образом, можно считать, что данное излучение не влияет на регистрируемый нами сигнал.

Другим важным параметром данной диагностики является расстояние между конвертором и маской. Увеличение данного расстояния приводит к улучшению разрешающей способности диагностики, однако, также может привести к наложению отпечатков бимлетов соседних отверстий. К тому же, для транспортировки электронного пучка используется внешнее магнитное поле, которое может существенно исказить траектории электронов и затруднить интерпретацию результатов. Для того, чтобы пренебречь влиянием внешнего магнитного поля и считать траектории электронов

баллистическими, расстояние между маской и конвертором должно удовлетворять условию

$$L \ll \lambda = V_e \frac{2\pi}{\Omega}, \quad (5)$$

где L - расстояние между маской и конвертором, λ – длина шага ларморовской спирали. Для нашего случая: внешнее магнитное поле 100 Гс и энергия электронов - 80 кэВ шаг ларморовской спирали составляет $\lambda = 587$ мм. На основе приведённых рассуждений расстояние между маской конвертором было выбрано 30 мм.

Пожалуй, наиболее важными элементами данной диагностики является пара люминофор-конвертор. В данной работе использовался имеющийся и уже испытанный медицинский люминофор ЭУГ-300 производства фирмы Ренекс (г. Новосибирск). Данный люминофор представляет собой лист пластика с нанесённым слоем оксисульфида гадолиния допированного тербием. Поверхностная плотность $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ составляет 55 мг/см². Плотность активного вещества люминофора 7.8 г/см³, $Z_{\text{эфф}} = 62$. Максимум свечения на длине волны 543 нм. Световыход составляет 35 фотонов на кэВ. Постоянная времени - 600 мкс, что заметно больше длительности пучка (~300 мкс), таким образом, выбранная диагностика показывает интегральную по времени картину угловых распределений. Для обработки результатов необходимо знать зависимость интенсивности света люминофора от плотности тока падающих на него электронов. В работе [2] было показано, что для данного люминофора в необходимом диапазоне параметров указанная зависимость является линейной.

Излучение, выделившееся на конверторе в результате взаимодействия с электронами, проходит через тело конвертора и попадает на люминофор. Выбор конвертора был обусловлен тремя критериями. Во-первых, он не должен разрушаться под воздействием электронов пучка. Во-вторых, он должен быть достаточно прозрачен для собственного излучения. В-третьих, излучение, прошедшее чрез конвертор должно эффективно поглощаться выбранным люминофором. Чтобы удовлетворить первому требованию конвертор должен быть изготовлен из тугоплавкого металла достаточной толщины. Для проверки второго и третьего требований были использованы спектры излучения взаимодействия электронов с веществом из статьи [8]. Для наглядности далее приведены расчеты для тантала толщиной 300 мкм. С учетом всех критериев и доступности было принято решение изготовить конвертор именно из такого материала. Согласно статье [9], глубина проникновения электронов в металл для наших параметров составляет 15 мкм, что много меньше толщины конвертора 300 мкм, таким образом,

можно считать, что все излучение образуется на поверхности пластины и проходит через всю ее толщину. Умножив спектр коллектора (рис.10, линия 1) на коэффициент пропускания конвертора (рис.10, линия 2), мы получим спектр прошедшего излучения (рис.11, линия 1). Затем, свернув спектр прошедшего излучения с коэффициентом поглощения люминофора (рис.11, линия 2), получаем количество фотонов,

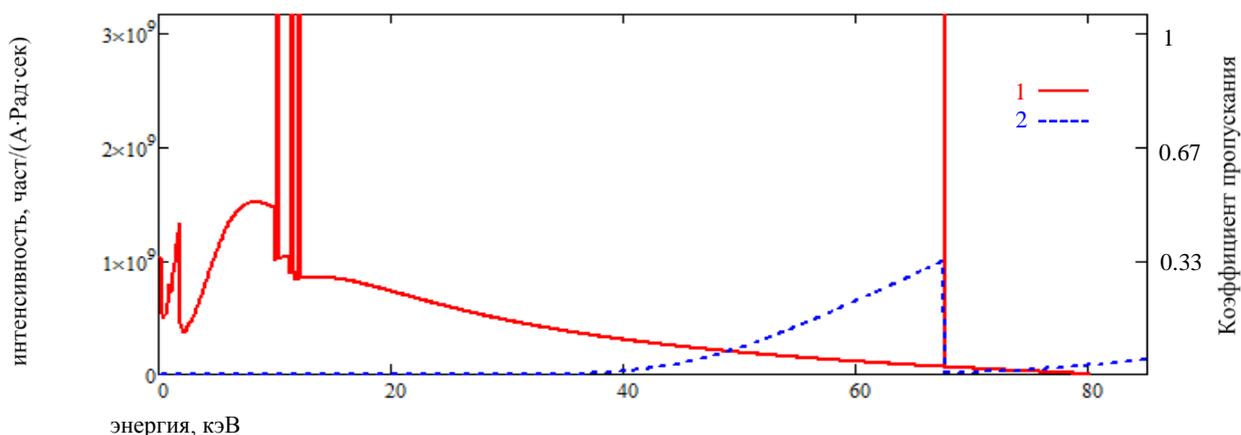


Рис.10: Спектр тантала при бомбардировке электронами(1) и коэффициент пропускания тантала 300 мкм(2)

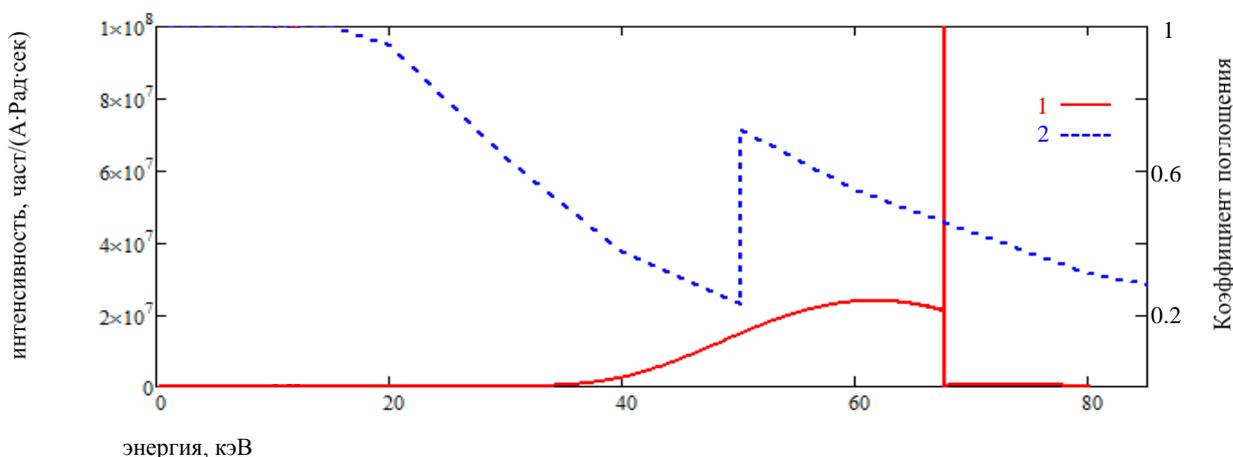


Рис.11: Спектр прошедшего через тантал собственного излучения(1) и коэффициент поглощения люминофора(2)

преобразовавшегося в оптический диапазон. Отношение этой свертки к интегралу от начального спектра (рис.10, линия 1) и будет долей преобразовавшегося в видимый свет излучения. Расчеты показывают, что выбранный материал обеспечивает преобразование в видимый свет 1.6% излучения со своей поверхности. Несмотря на значительную потерю энергии излучения, в связи с достаточно большой мощностью исходного пучка, в экспериментах недостатка света не наблюдается.

На рис. 12 изображен внешний вид диагностики в частичном сборе: отсутствует зеркало, рамка для крепления конвертора и люминофора установлена, однако отсутствуют

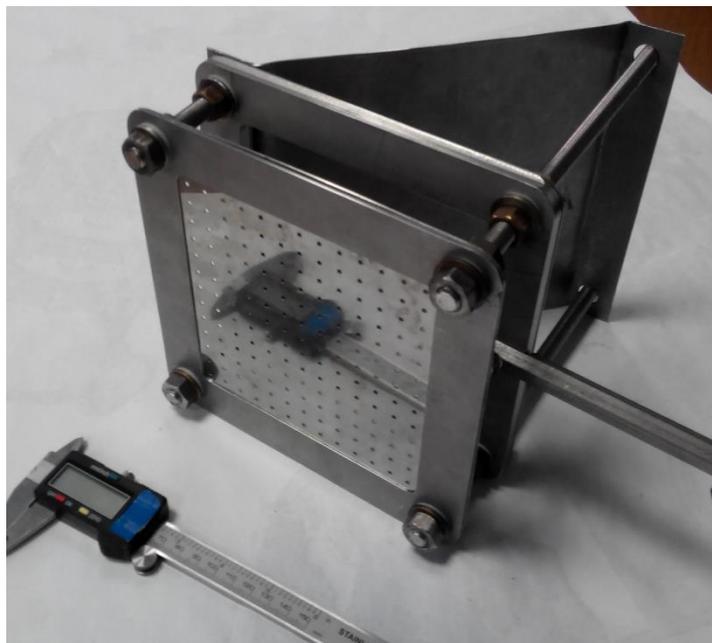


Рис.12: Внешний вид изготовленной диагностики без зеркала, конвертора и люминофора

сами конвертор и люминофор.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В экспериментах по измерению пространственных и угловых характеристик пучка электронов диагностика размещалась на пути пучка в расширительном баке установки на расстоянии ~ 1 м от ЭОС. Конструкция предусматривает возможность перемещения диагностики с пути пучка без нарушения вакуума установки и транспортировку пучка в многопробочную секцию для проведения других экспериментов. Схема установки представлена на рис. 13, штрихованным прямоугольником обозначено место установки диагностики, красным обозначены катушки, задействованные в данных экспериментах.

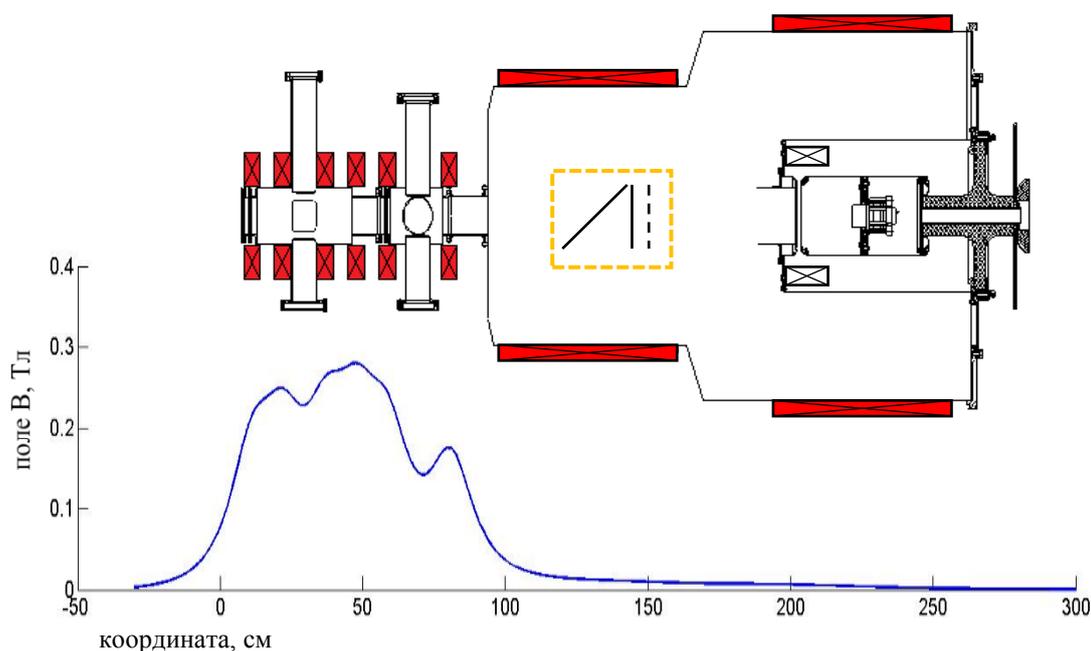


Рис.13: Схема установки диагностики: место установки обозначено штрихованным прямоугольником, красным обозначены основные катушки, синим изображен график магнитного поля на оси установки

На нижнем графике показана рассчитанная величина магнитного поля на оси установки.

В результате проведенных экспериментов были получены снимки свечения люминофора. Первичный, необработанный снимок для выстрела №94 показан на рис. 14.

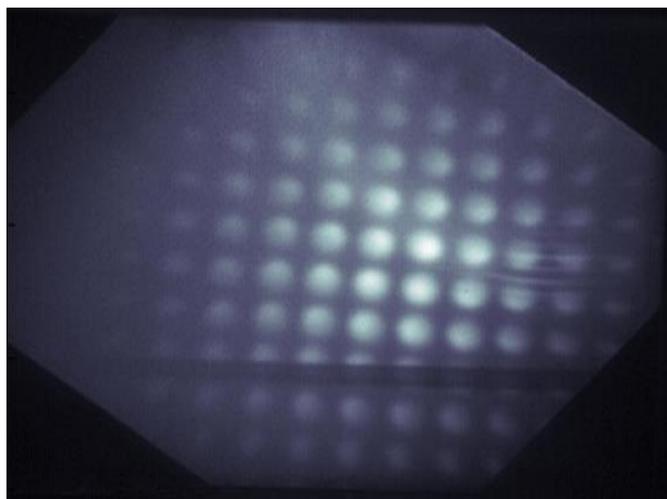


Рис.14: Снимок свечения люминофора эксперимента №94

Параметры электронного пучка в данном выстреле: магнитное поле в области диагностики 280 Гс, магнитное поле в области источника пучка 90 Гс, ускоряющее напряжение 95 кВ, установившийся ток пучка 10 А, длительность пучка 300 мкс. На снимках видно множество ярких отпечатков - каждый соответствует своему отверстию в маске. Характерные размеры большинства отпечатков заметно больше диаметра отверстия 2 мм, что свидетельствует о наличии поперечных скоростей. Анализируя форму отпечатков, можно оценить угловые характеристики пучка. Яркость данных отпечатков позволяет судить о распределении плотности тока.

В качестве первичной обработки края снимков были обрезаны, а также был произведен поворот на $52^\circ = 45^\circ + 7^\circ$. Поворот на 45° был выполнен для того, чтобы, измеряя горизонтальный и вертикальный профили интенсивности, отпечатки каждого бимлета были разделены сильнее. Поворот на 7° обусловлен вращением пучка как целого. Такое вращение, по-видимому, связано с наличием собственного тангенциального магнитного поля, а также с дрейфом электронов в скрещенных полях: внешнем магнитном и собственный электрическим полем пучка. Также к изображениям было применено сглаживание с характерным размером 3 пикселя (0.4 мм).

Как говорилось ранее, в качестве материала конвертора использовалась танталовая фольга толщиной 300 мкм. При этом конвертор состоял из двух полос танталовой фольги, соединённых «внахлест». Данный факт объясняет наличие на снимках горизонтальной тёмной полосы — место соединения двух полос тантала, где толщина конвертора составляет 600 мкм. Ширина данной полосы известна и составляет 4 мм, также известна ширина ее изображения на снимке – 30 пикселей, таким образом ширина одного пикселя соответствует 0.133 мм. Несмотря на потерю части изображения, данная полоса позволяет оценить разрешение данной диагностики исследовав профиль интенсивности вблизи края

темной полосы. Как известно, для оптической системы получаемый на выходном изображении профиль изображения $g(x)$ связан с истинным $f(x)$ через аппаратную функцию $a(x)$ по формуле

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x')a(x - x')dx', \quad (6)$$

вблизи края темной полосы $f(x)$ представляет из себя “ступеньку”, тогда

$$g(x) = \pm \int_{-\infty}^x a(x')dx', \quad (7)$$

отсюда

$$a(x) = \pm \frac{dg(x)}{dx}, \quad (8)$$

где знак зависит от того, какой из двух краев полосы мы рассматриваем. Таким образом, построив производную от профиля интенсивности на краю темной полосы, мы с точностью до множителя получим аппаратную функцию. На рис. 15,б показан фрагмент снимка с изображением темной полосы. Вдоль красной прямой был построен профиль интенсивности, показанный на рис. 15,а красной линией. Синей линией на рис. 15,а

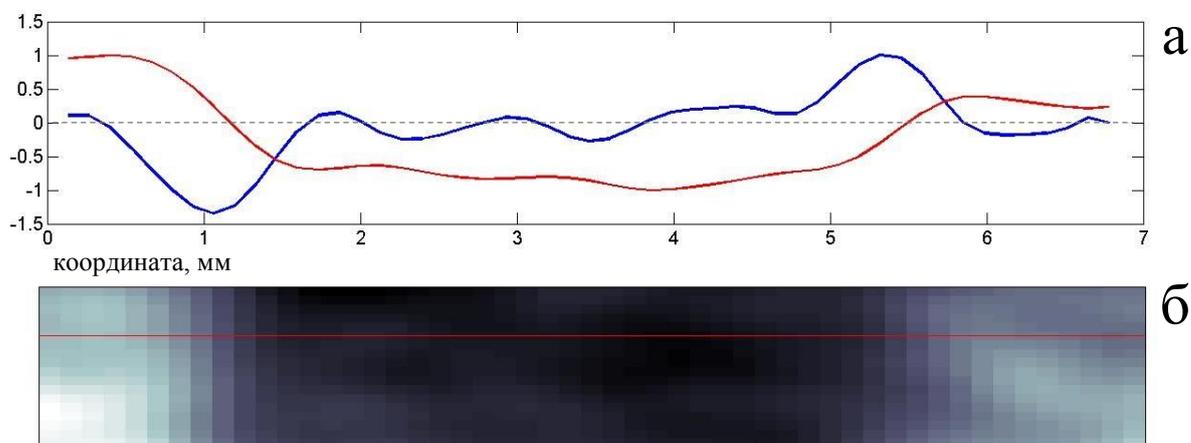
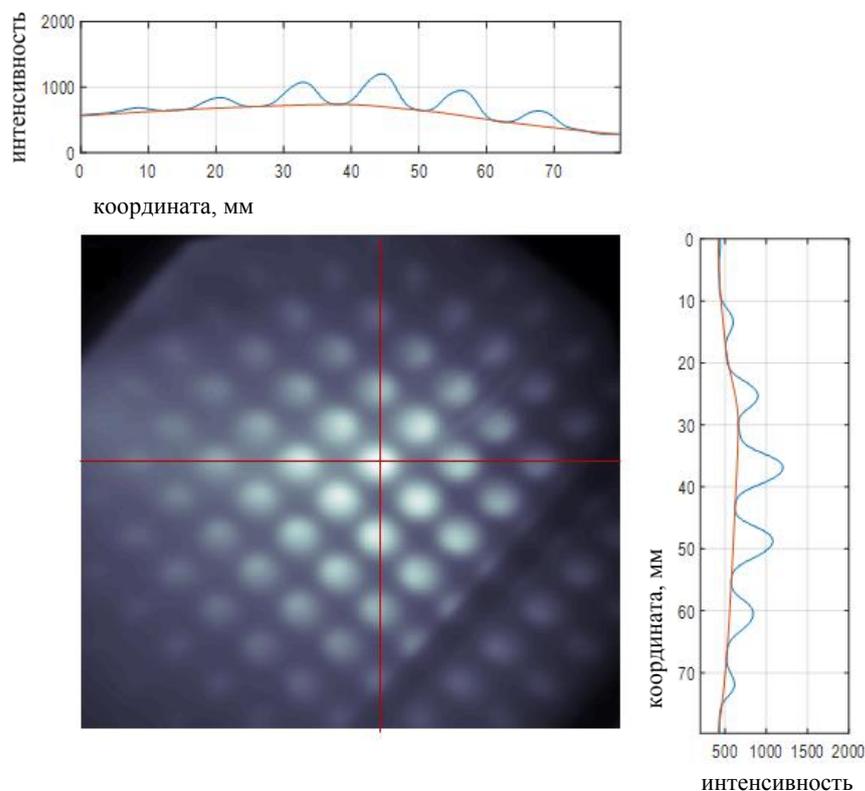


Рис.15: Профиль интенсивности поперечного сечения темной полосы (а, красная линия), его производная (а, синяя линия) и фрагмент снимка с изображением темной полосы (б)

показана производная от этого профиля.

Помимо различных сторонних искажений, на графике производной отчетливо виден пик, соответствующий аппаратной функции. Характерная ширина пика – около 1 мм. Данная аппаратная функция характеризует разрешение системы конвертор-люминофор-камера, также учитывая сглаживание при обработке. Исходя из характерной ширины аппаратной функции, это разрешение составляет около 1 мм.

По получившимся изображениям были построены профили интенсивности. На рис. 16 в центре изображен обработанный снимок, синими линиями на графиках изображены



*Рис.16: Профили интенсивности обработанного снимка №94.
Оранжевая линия соединяет локальные минимумы профилей
интенсивности.*

профили интенсивности двух сечений вдоль красных прямых, показанных на снимке.

Видно, что отпечатки хорошо отделены, однако присутствует неравномерный фон, который не связан с угловым распределением, о чем говорят отчетливые плато между каждым отпечатком. Сплайновая интерполяция фона, найденная по локальным минимумам, изображена оранжевой линией. Она, как мы считаем, хорошо аппроксимирует фон. Значительная часть фона связана с рассеянным рентгеновским излучением. В пользу данной гипотезы говорят эксперименты, в которых электронный пучок транспортировался в расходящемся магнитном поле, создаваемом катушками собственного магнитного поля источника. Схема включения катушек и конфигурация магнитного поля для этого эксперимента показана на рис. 17.

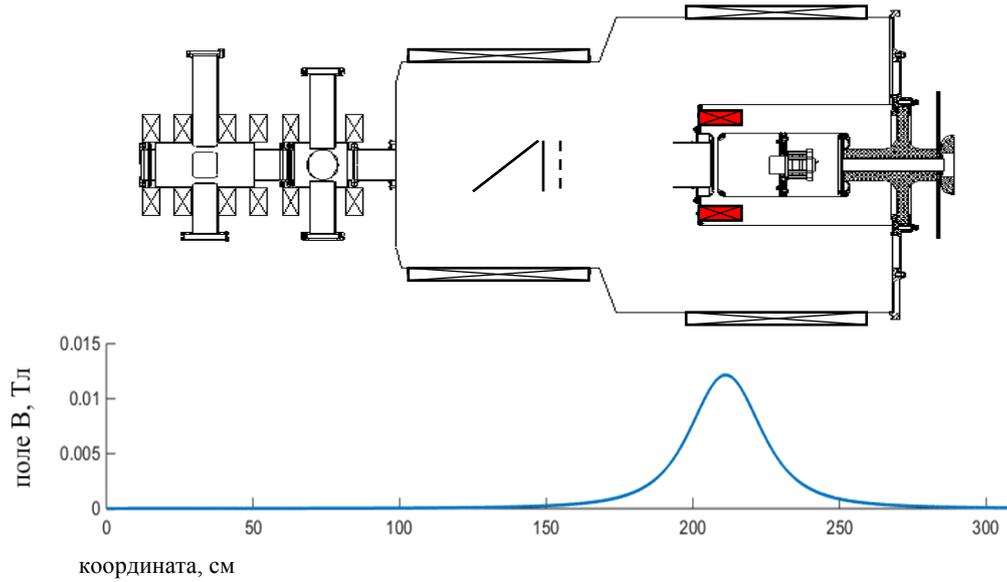


Рис.17: Схема работы установки при работе на собственном поле источника: красным обозначены собственные катушки источника, синим изображен график магнитного поля на оси установки

Красным цветом обозначены используемые катушки, синей линией показано значение продольной компоненты магнитного поля на оси установки. Видно, что поле в области источника равнялось ~ 120 Гс и быстро спадало при движении пучка к диагностике. При этом большая часть тока пучка приходилась на стенки вакуумной камеры, и лишь малая доля тока попадала на диагностику. На рис. 18 показан один из снимков, полученных в

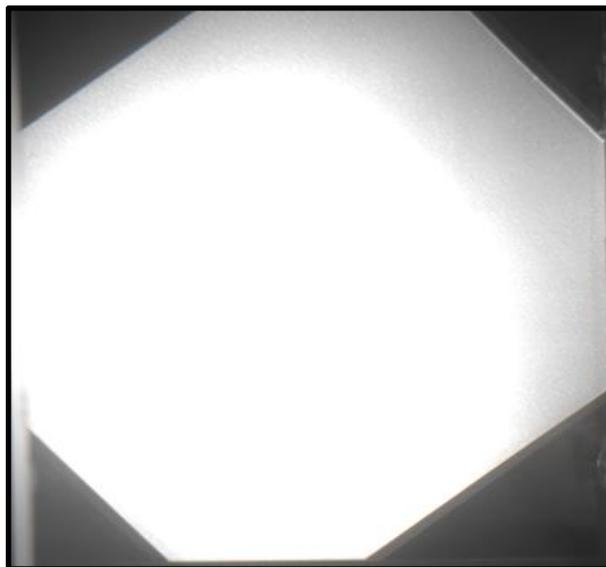


Рис.18: Засветка люминофора рентгеновским излучением со стенок вакуумной камеры при выстреле в собственном поле источника(а) и катушки собственного поля источника(б)

данных экспериментах.

На снимке видно свечение люминофора, заметно более яркое, чем при включенном ведущем магнитном поле, что свидетельствует о наличии рассеянного рентгеновского излучения.

Другим, и, по нашему мнению, основным механизмом образования фоновой засветки люминофора является жесткое рентгеновское излучение, возникающее при взаимодействии отраженных от конвертора электронов с оборотной стороной маски. Пользуясь формулой для коэффициента отражения электронов от материала мишени η из статьи [8], для наших условий получаем $\eta = 0.498$, то есть ~50% электронов отражается от конвертора. При этом, большинство отраженных электронов имеет энергию порядка 80% от энергии падающих электронов [9] и имеют распределение $f \sim \cos(\theta)$ по углу θ между скоростью электрона и нормалью к поверхности [10]. Отраженные электроны, в свою очередь, попадая на маску, частично поглощаются там, испуская достаточно жесткое рентгеновское излучение. Данное излучение, в отличие от излучения электронов начального пучка, падающего на маску, не ослабляется материалом маски. Имея достаточно сильную высокоэнергетическую компоненту (материал маски – молибден), излучение от отраженных электронов эффективно проходит через конвертор, попадая на люминофор и создавая неравномерный фон. На рис. 19 изображен спектр излучения взаимодействия электронов с молибденом (линия 1), рассчитанный с помощью статьи [8],

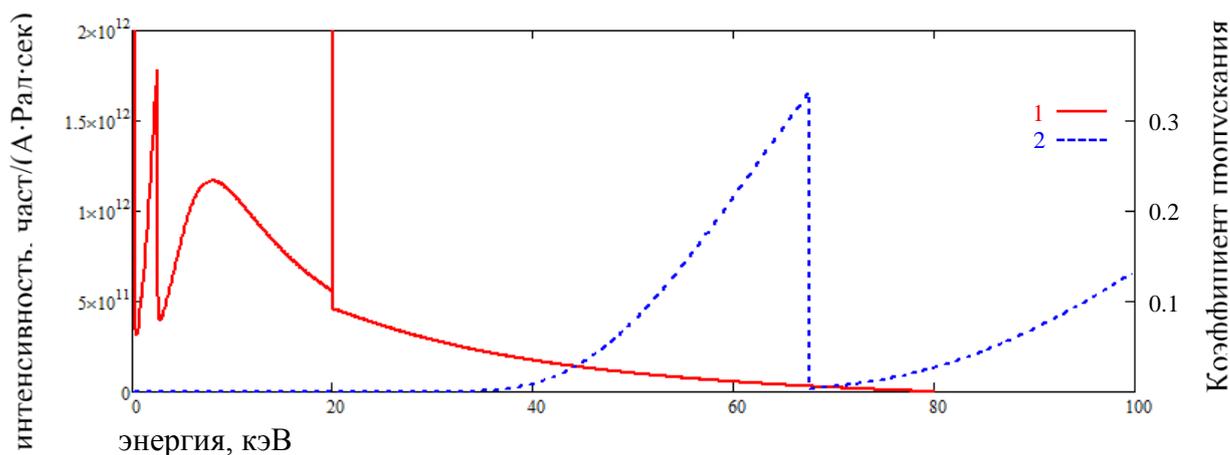


Рис.19: Спектр излучения молибдена(1) и коэффициент пропускания тантала 300 мкм(2)

и коэффициент пропускания тантала толщиной 300 мкм (линия 2).

Свертка этих двух графиков составляет 0.6% от интеграла по начальному спектру. Это означает, что через конвертор пройдет 0.6% энергии излучения отраженных электронов, что существенно на фоне 1.6% энергии рентгеновского излучения неотраженных электронов прошедшей через конвертор.

Для того, чтобы устранить этот сценарий образования фона в дальнейшем, планируется установка перфорированной пластины из материала с малым Z (например, алюминия) с обратной стороны маски. Отраженные электроны, при поглощении на такой пластине, создадут излучение с меньшей долей жесткого рентгена в спектре, которое будет намного менее эффективно проходить через конвертор и засвечивать люминофор. Также, коэффициент отражения от алюминия $\eta=0.126$ заметно меньше, чем соответствующий коэффициент молибдена $\eta=0.375$, что будет препятствовать засветке за счет повторного отражения электронов обратно на конвертор.

На данном этапе для получения непосредственно профилей интенсивности бимлетов из изображений была вычтена сплайновая интерполяция фона, найденная по локальным минимумам (изображена на рис. 16 оранжевыми линиями). Профили интенсивности с вычетом фона показаны на рис. 20 синей линией.

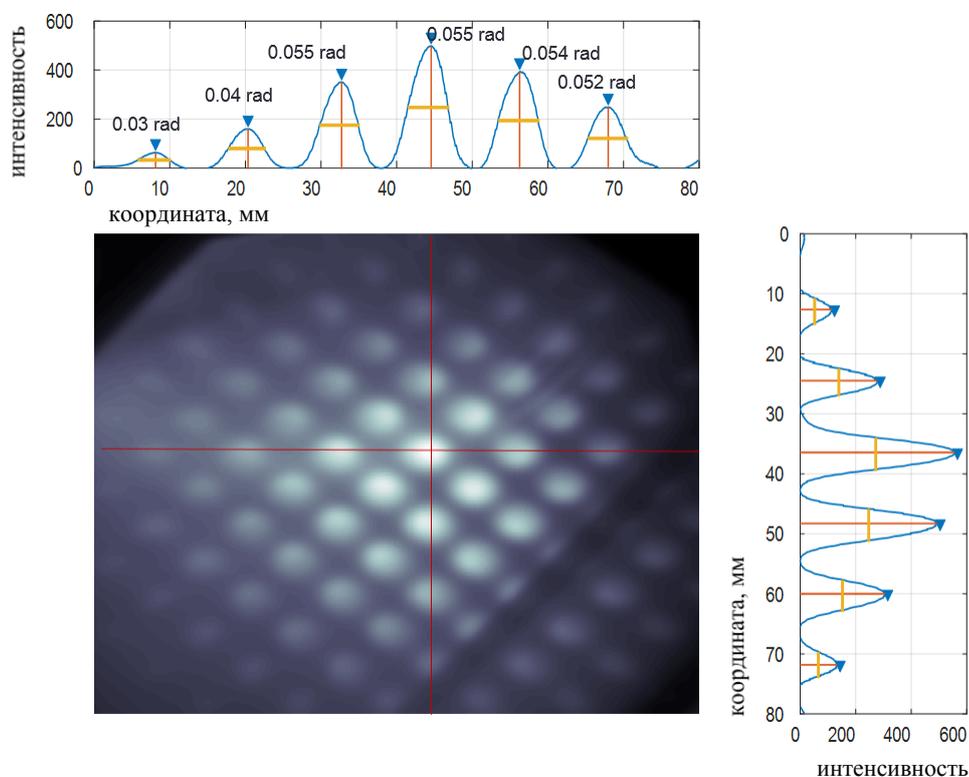


Рис.20: Профили интенсивности обработанного снимка №94 с вычетом аппроксимированного фона (синие линии) и ширины отпечатков на полувысоте (оранжевым).

Используя данные профили, можно оценить угловые характеристики частиц определенного бимлета с точностью до некоторой постоянной компоненты, соответствующей смещению отпечатка относительно параллельной проекции отверстия маски на конвертор.

Анализируя профиль отпечатка бимлета, можно определить характерный угол электронов в соответствующей точке сечения пучка. На рис. 20 оранжевым цветом изображена ширина отпечатка на полувысоте и соответствующий характерный угол электронов относительно оси диагностики. Данный угол был вычислен по формуле

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{h-r}{l}\right), \quad (9)$$

где h – полуширина на полувысоте, $l = 30$ мм – расстояние маска-конвертор, $r = 1$ мм – радиус отверстий маски. Характерный угол для наиболее яркого отпечатка в выстреле №94 составляет ~ 55 мрад.

Помимо угловых характеристик данная диагностика позволяет получить распределение плотности тока в пучке. Интегрируя интенсивность отпечатка каждого бимлета, можно получить число, пропорциональное току, прошедшему через соответствующее отверстие. Разрешение определяется шагом отверстий маски. На рис. 21 оранжевыми точками изображено значение такого интеграла в зависимости от координаты максимума соответствующего отпечатка.

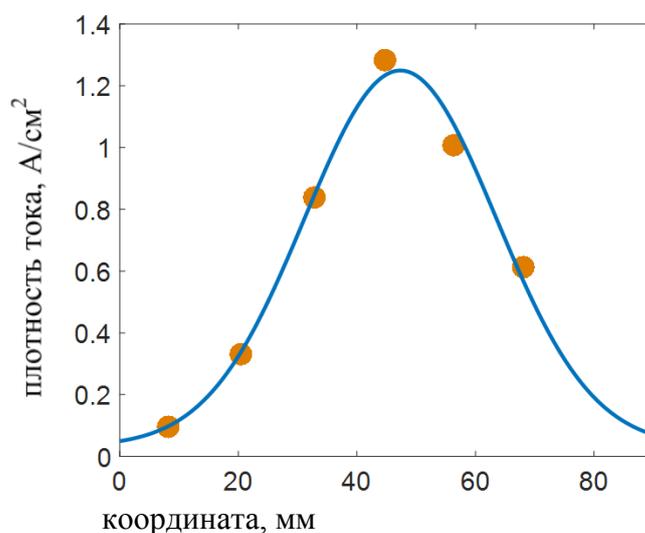


Рис.21: Профиль плотности тока пучка в выстреле №94

Для упрощения расчетов считалось, что отпечаток симметричен относительно собственного центра и имеет гауссов профиль. Получившиеся на рис. 21 значения интегралов были аппроксимированы двумерной гауссовой функцией, нормированной на полный ток пучка в случае выстрела №94 равного 10 А. Получившийся профиль плотности тока показан синей линией на рис. 21, максимальная плотность тока составляет $\sim 1.2 \text{ А/см}^2$, характерный диаметр пучка $\sim 40 \text{ мм}$.

Для наиболее яркого отпечатка в выстреле №94 было произведено сравнение результатов измерений с численным моделированием в программе PBGUNS. На рис. 20 показано, что угловая расходимость самого яркого бимлета составляет $\sim 55 \text{ мрад}$. Также из графика, показанного на рис. 21, плотность тока в области соответствующего отверстия составляет $\sim 1.2 \text{ А/см}^2$. При моделировании выхода электронов из эмиссионной плазмы через отверстие ЭОС источника пучка учитывалось, что плотность эмиссионного тока в 5 раз выше плотности тока пучка, так как геометрическая прозрачность ЭОС составляет 20%. В то же время магнитное поле в области диагностики составляет 280 Гс и выше чем магнитное поле в области ЭОС, которое составляет 90 Гс, а значит плотность тока в

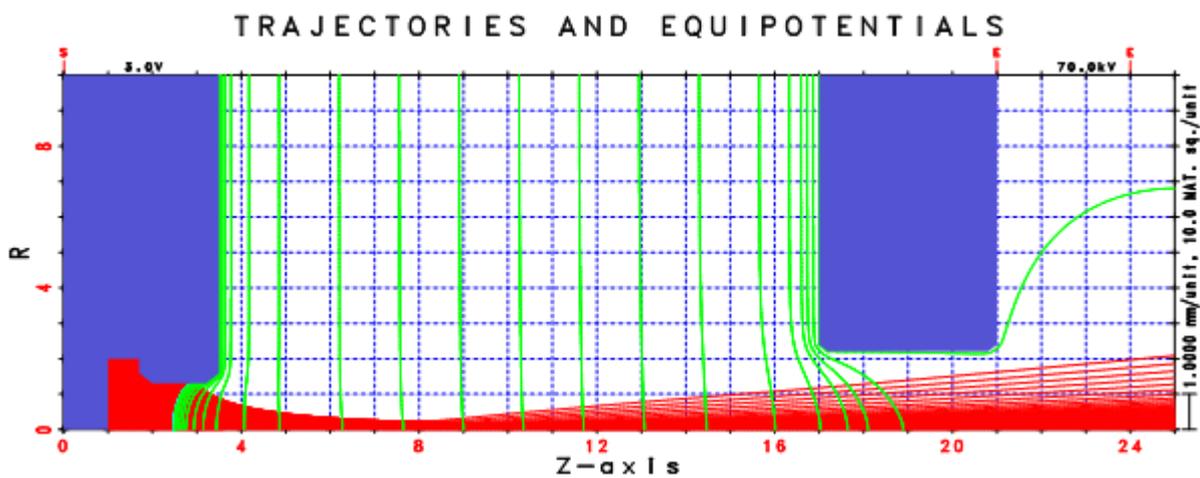


Рис.22: Моделирование выхода электронов из эмиссионной плазмы для выстрела №94 в программе PBGUNS: красным обозначены рассчитанные траектории, синим – электроды ЭОС, зеленым – эквипотенциали электрического поля

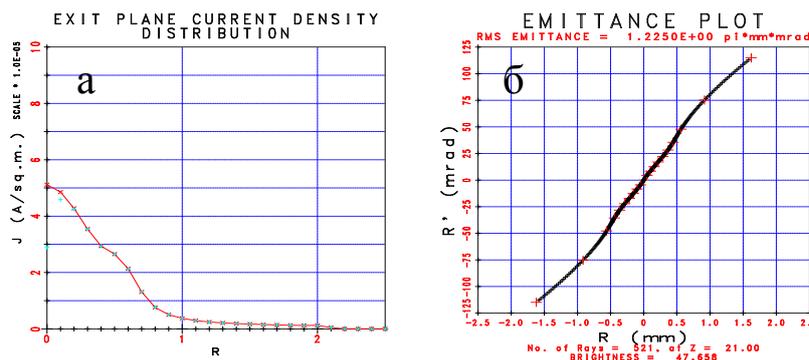


Рис.23: Моделирование выхода электронов из эмиссионной плазмы для выстрела №94 в программе PBGUNS: профиль плотности тока(а) и кривая эмиттанса(б).

области диагностики выше примерно в 3 раза (отношение магнитных полей) чем плотность тока в области ЭОС. Таким образом при моделировании использовались следующие параметры: плотность тока 2 А/см^2 , ускоряющее напряжение 95 кВ, магнитное поле $B = 100 \text{ Гс}$. Результаты моделирования показаны на рис. 22 и 23.

На рис. 22 синим цветом изображена геометрия ЭОС, красным цветом - рассчитанные траектории электронов, зеленым цветом - эквипотенциали электрического поля. На рис. 23 изображены профиль плотности тока выходного пучка (а) и кривая эмиттанса (б).

Зная распределение угла электронов (кривая эмиттанса) и плотности тока (профиль плотности тока) от координаты, мы можем вычислить средний угол по формуле

$$\langle \theta \rangle = \frac{2\pi \int j(r) \frac{d\theta}{dr} r dr}{I}, \quad (10)$$

где r – координата, $j(r)$ – плотность тока, $\theta(r)$ – угол электронов относительно оси отверстия, I – полный ток через отверстие. Вычисленное значение среднего угла составило $\langle \theta \rangle = 85$ мрад.

Аналогичные расчеты были проведены для выстрела №90. Параметры выстрела: магнитное поле в области диагностики 280 Гс, магнитное поле в области источника 90 Гс, ускоряющее напряжение 85кВ, току пучка 50 А, длительность пучка 120 мкс, снимок

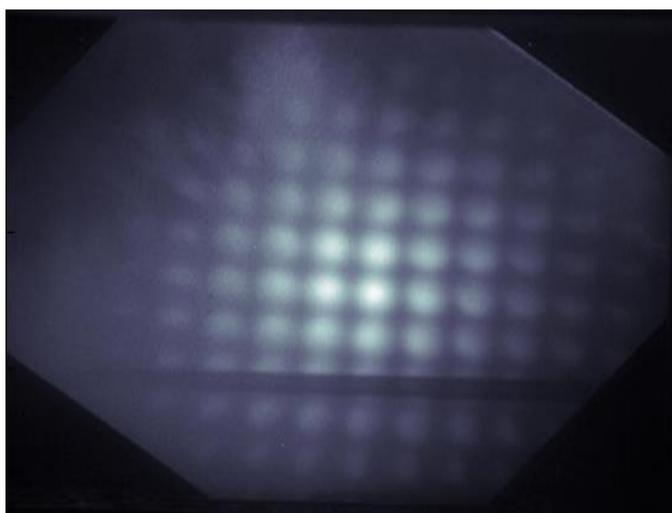


Рис.24: Снимок свечения люминофора эксперимента №90, параметры: $B_{pp} =$

280 Гс , $B_{bs} = 90 \text{ Гс}$, $U_{acc} = 85 \text{ кВ}$, $I_b = 50 \text{ А}$, $T = 120 \text{ мкс}$.

свечения люминофора для которого показан на рис. 24.

Полученные профили интенсивности (синими линиями) и угловые ширины отпечатков показаны на рис. 25, наиболее яркий отпечаток имеет угловую расходимость ~ 60 мрад.

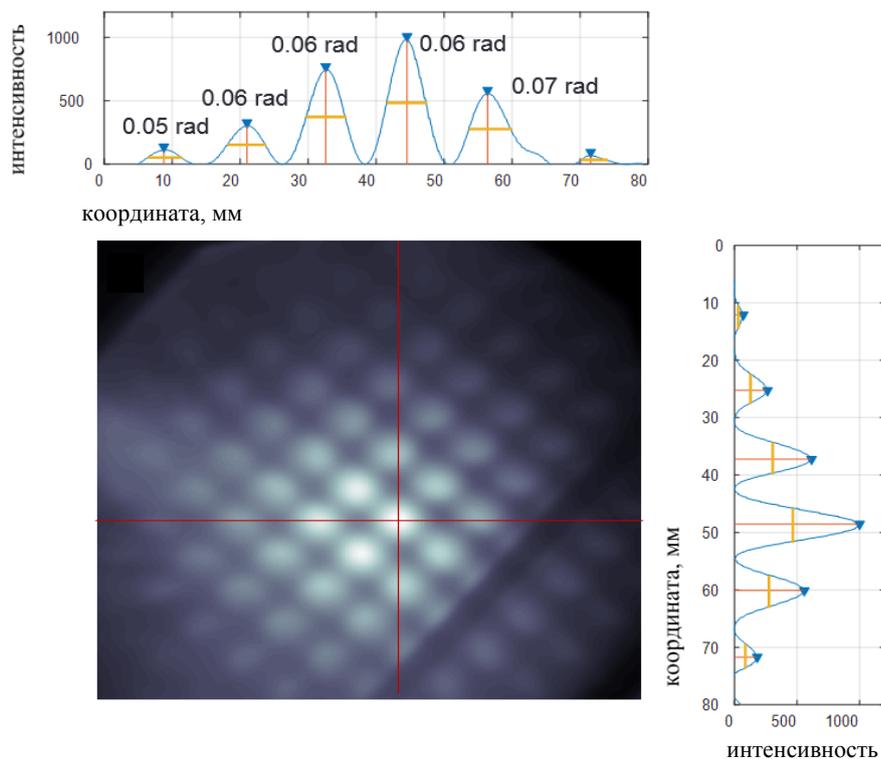


Рис.25: Профили интенсивности обработанного снимка №90 с вычетом аппроксимированного фона (синие линии) и ширины отпечатков на полувысоте (оранжевым).

Профиль плотности тока показан на рис. 26.

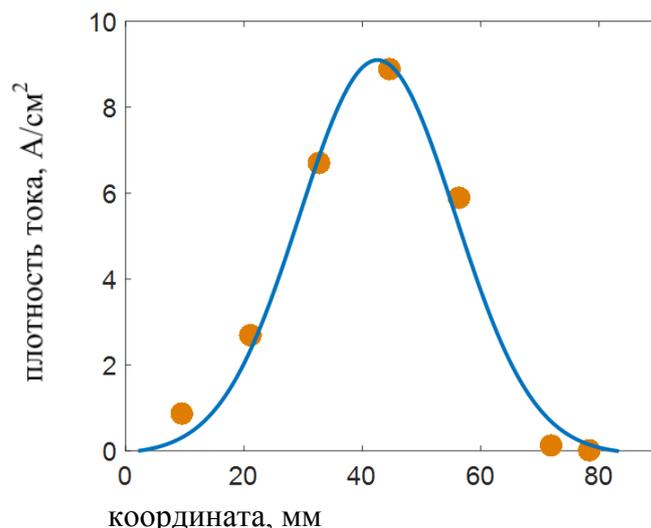


Рис.26: Профиль плотности тока пучка в выстреле №90

Значения плотности тока в соответствующих бимлетам отверстиях маски показаны оранжевыми точками, аппроксимирующий профиль плотности тока показан синей линией. Ширина пучка ~40 мм, плотность тока в области самого яркого отпечатка ~9 А/см². Для данного отпечатка также было проведено моделирование в программе PBGUNs, со следующими параметрами: плотность тока 15 А/см², напряжение между электродами 85 кВ, магнитное поле $B = 100$ Гс. В результате моделирования был получен средний угол $\langle\theta\rangle=103$ мрад.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что и в эксперименте, и в моделировании наблюдается увеличение характерного угла электронов при увеличении плотности тока пучка. Отличия величины полученных в эксперименте углов от расчетных можно объяснить использованием в расчетах достаточно простой модели плазменного эмиттера (не учитывался тепловой разброс электронов, профиль эмиссии считался однородным, не учитывался встречный поток ионов). Принимая во внимание вышесказанное, согласие моделирования и эксперимента можно считать удовлетворительным.

В качестве верификации соответствия получаемых результатов угловым характеристикам электронов пучка был проведён дополнительный эксперимент. В этом эксперименте параметры пучка и магнитное поле в области источника фиксировались: ускоряющее напряжение 85кВ, ток пучка 50 А, магнитное поле в области источника 90 Гс, менялось только поле в области диагностики. Обработанные снимки полученные в этом

эксперименте показаны на рис. 27. Рис. 27 а, б соответствуют выстрелам с полем в области диагностики 280 Гс и 380 Гс соответственно.

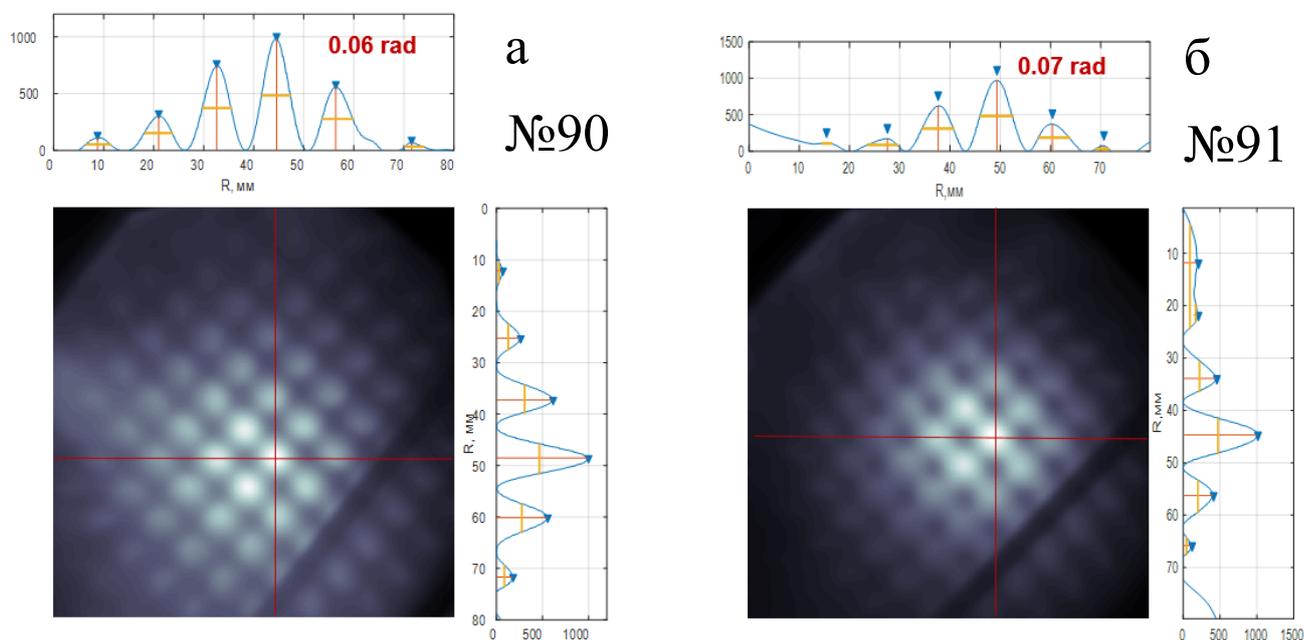


Рис.27: Профили интенсивности и характерный угол самого яркого отпечатка для выстрелов №90 и №91

Видно, что увеличение магнитного поля в области диагностики приводит к сжатию пучка электронов. В тоже время в более сильном магнитном поле отпечатки бимлетов стали несколько шире. Численно это выражается в том, что полуширина отпечатка в поле 280 Гс соответствует углу 0.06 рад, а в поле 380 Гс - 0.07 рад. При этом сравнивались наиболее яркие отпечатки бимлетов. Данное увеличение углов является ожидаемым следствием увеличения магнитного поля, в предположении, что электронный пучок является замагниченным, а магнитное поле изменяется адиабатически. Ожидаемое увеличение углов при увеличении магнитного поля составляет $\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} = \sqrt{\frac{380 \text{ Гс}}{280 \text{ Гс}}} \approx 1.16$ раз, в эксперименте же мы получаем 1.16. Таким образом, полученные результаты позволяют говорить о состоятельности рассматриваемой диагностики и о связи сделанных измерений именно с угловыми характеристиками пучка.

Заключение

Создана диагностика угловых характеристик мощного пучка электронов на базе методики “*perregr pot*”. Данная диагностика позволяет получить зависимости угловых характеристик электронов от координаты сечения пучка с разрешением ~ 1 мм. Также созданная диагностика позволяет получить информацию о положении пучка и восстановить его профиль плотности тока.

В тестовых экспериментах для пучка с током 10 А, энергией электронов ~ 95 кэВ и длительностью 300 мкс характерный угол составил ~ 55 мрад. Максимальная плотность тока составила ~ 1.2 А/см² при диаметре пучка ~ 40 мм. Для пучка с током 50 А, энергией электронов 85 кэВ и длительности 120 мкс характерный угол составил ~ 60 мрад. Максимальная плотность тока составила ~ 9 А/см при диаметре пучка ~ 40 мм.

Также было проведено численное моделирование в программе PBGUNS. Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования показало их удовлетворительное согласие и общие тенденции к повышению характерных углов при повышении плотности тока. Расхождение абсолютных значений углов, полученных при помощи моделирования, с экспериментом объясняется неточностью модели плазменного эмиттера, заложенной в программу PBGUNS.

Дополнительные эксперименты с вариацией магнитного поля в области диагностики показали полное совпадение поведения измеренных угловых характеристик с предсказаниями теорией адиабатического распространения заряженных частиц.

Определены пути дальнейшей оптимизации диагностики, в частности, добавление алюминиевой пластины с обратной стороны маски для уменьшения фоновой засветки люминофора.

Список литературы

- [1] *А. Бабкин и П. Быков*, «Атомная энергия», т. 93.,6, 2002.
- [2] *В. В. Куркучев, И. В. Кандауров, Ю. А. Трунев и И. А. Иванов*, «Измерение распределения плотности тока электронного пучка на металлической мишени с помощью рентгеновской изображающей диагностической системы» //Известия вузов.

- [3] *A. Климов*, «Экспериментальные методы в сильноточной электронике» Издательство Томского политехнического университета, 2013.
- [4] *P. H. d. Haan, R. N. Singht, H. J. Hopman, G. C. A. M. Janssen, E. H. A. Granneman and P. S. Strelkov*, «A simple angular distribution analyser for a relativistic electron beam» //Journal of Physics E: Scientific Instruments, March 1981.
- [5] *A. Pikin, A. Kronou, J. Ritter u V. Zajic*, «Pepper Pot Emittance Meter» //C-A/AP/#244, July 2006.
- [6] *J. J. Choi, R. M. Gilgenbach, T. A. Spencer, P. F. Menge u C. H. Ching*, «Measurement of long-pulse relativistic electron beam perpendicular- to-parallel velocity ratio by Cherenkov emission and radiation darkening on a glass plate» //Review of Scientific Instruments, Vol. 63, No. 2, February 1992.
- [7] *C. W. Roberson, G. Saenz u D. Tzach*, «Pitch angle measurement of an intense rotating relativistic electron beam» //Review of Scientific Instruments, Vol. 48, No. 7, July 1977.
- [8] *E. Horst*, «Fundamental parameter programs: algorithms for the description of K, L and M spectra of X-Ray tubes», Denver X-Ray Conference, 2006.
- [9] *K. Kanaya u S. Okayama*, «Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets» //Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 5, Issue 1, January 1972.
- [10] *V. E. Cosslett u R. N. Thomas*, «Multiple scattering of 5-30 keV electrons in evaporated metal films: I. Total transmission and angular distribution» //BRIT. J. APPL. PHYS., VOL. 15, 1064.
- [11] *E. J. Sternglass*, «Backscattering of Kilovolt Electrons from Solids» //Physical Review, 15 July 1954.