

Глава 2. МДМ–катоды для наносекундных ускорителей электронов

2.1. Введение

Катод является одним из критических элементов наносекундных ускорителей электронов. Исторически первый тип катода, который использовался в НУЭ – взрыво-эмиссионный. Однако он может работать только при высокой напряженности электрического поля (>50 кВ/см), имеет существенную (десятки наносекунд) задержку появления тока при подаче напряжения и достаточно быструю потерю эмиссионных свойств [2.1, 2.2], что создало необходимость разработки новых типов катодов, особенно для частотных ускорителей.

Подход к решению состоял в создании катодов, основанных на использовании эмиссии электронов из плазмы (дугового разряда, разряда с полым катодом и др.) [2.3]. В этих типах катодов плазма появляется до ускоряющего напряжения, что позволяет полностью контролировать ее параметры. Однако использование этих катодов требует дополнительных источников энергии, систем запуска и синхронизации, что существенно усложняет конструкции и затрудняет использование этих видов катодов в технологических НУЭ.

Существующие холодные металлодиэлектрические катоды имеют удовлетворительные характеристики. Принцип их действия основан на использовании эмиссии электронов из плазмы незавершенного импульсного разряда по диэлектрику в вакууме [2.4]. С использованием большого числа таких незавершенных разрядов в вакууме по поверхности диэлектрика создан МДМ–катод (метал–диэлектрик–метал) [2.5], позволяющий обеспечивать равномерное распределение разряда по всей поверхности диэлектрика на достаточно больших площадях. Конструктивно МДМ–катод представлял собой пластину диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью ϵ (титанат бария), к которой плотно прижималась металлическая сетка.

Исследования скользящего разряда по поверхности титаната бария в вакууме [2.6] позволили установить, что разряд на диэлектрике возникает с порогового значения напряжения, величина которого растет с уменьшением ϵ , увеличением толщины диэлектрика и укорочением импульса. Механизм начала разряда связан с наличием микроразрывов на поверхности металла и диэлектрика в области контакта, что приводит к резкому усилению напряженности электрического поля в этих микроразрывах и как следствие взрывной эмиссии электронов из металла. Таким образом, на поверхности диэлектрика появляется плотная плазма, которая как бы увеличивает площадь элек-

трода и существенно (в разы) снижает работу выхода. Разряд начинает развиваться с краев плазменного образования. Это приводит к нагреву диэлектрика под воздействием электронной бомбардировки, испарению материала диэлектрика и последующей ионизации этих паров. Спектрографические исследования показали, что в спектре свечения разряда регистрируются линии бария и других компонентов диэлектрика, а также материал металлического острия. Дальнейшие исследования взрывной эмиссии из МДМ–катода [2.7] позволили установить, что крутизна фронта импульса тока пучка электронов зависит от площади эмитирующей плазменной поверхности.

МДМ–катод обеспечивает быстрое образование плазменной поверхности за счет не только взрывной эмиссии из металла, но и образования плазмы на поверхности диэлектрика под воздействием электронной бомбардировки из возникшей плазмы, так как при ее расширении по поверхности диэлектрика на фронте плазмы существует тангенциальное по отношению к поверхности электрическое поле, которое и вытягивает электроны из плазмы, направляя их на поверхность. Это приводит к дополнительному образованию плазмы на поверхности диэлектрика, увеличению скорости роста поверхности плазмы и нарастания тока.

На основе полученных данных авторами [2.8] разработана конструкция МДМ–катода, состоящего из набора плоских диэлектрических плазмообразующих элементов, установленных вертикально в металлическое основание. К диэлектрическим элементам прижимаются металлические гребенки, имеющие упругий контакт с диэлектриком и электрический контакт с основанием. Подобные катоды прекрасно работают в НУЭ и позволяют создавать эмитирующие поверхности больших размеров. Однако МДМ–катод требует для начала работы достаточно высокую напряженность электрического поля, а ресурс катодов ограничивается эрозией поверхности диэлектрика.

Для снижения напряженности электрического поля один из вариантов МДМ–катода [2.9] содержит дополнительный внешний электрод. При приложении импульса запуска, который подается до прихода основного импульса, между катододержателем и внешним электродом, выполненным в виде полосы, происходит незавершенный пробой, инициирующийся в тройных точках, т.е. в тех, в которых контактируют металл и диэлектрик в вакууме [2.10]. Это позволяет управлять параметрами формируемого электронного пучка при средней напряженности электрического поля (<20 кВ/см) ускоряющего напряжения с плотностью электрического тока до 25 А/см², без образования взрывоэмиссионной плазмы [2.9, 2.10]. К недостаткам катода можно отнести быстрое снижение эмиссионных свойств таких катодов [2.11,2.12] при плотности элект-

трического тока $> 100 \text{ А/см}^2$, а также то, что он требует использования дополнительного источника энергии, систем его запуска и синхронизации.

К моменту начала работы имелись некоторые данные по совместной работе схемы формирования импульса с ППТ и вакуумного диода с МДМ–катодом [2.13,2.14]. Сведения по работе вакуумного диода с взрывоэмиссионным [2.15] и МДМ [2.16] катодами при низком вакууме не позволяли однозначно определить параметры узла катода, их влияние на импеданс вакуумного диода и распределение тока пучка электронов на аноде. Поэтому целесообразно было продолжить эти исследования, чтобы установить характер изменения импеданса вакуумного диода с МДМ–катодом, а также размер и структуру формируемого пучка электронов, что существенно как при выводе пучка электронов в атмосферу, так и во многих практических приложениях.

2.2. Исследования элемента МДМ–катода на ускорителе УРТ-0,2

2.2.1 Описание эксперимента

Эксперименты выполнялись на частотном наносекундном ускорителе электронов УРТ-0,2 [2.17] (см. главу 1). Вакуумный диод ускорителя работал на форвакууме при давлении около 10^{-2} Торр.

Катоды больших размеров состоят из набора определенным образом расположенных на катододержателе однотипных элементов, каждый из которых является самостоятельным катодом [2.8]. Изменяя расположение и количество этих элементов, можно изменять размеры электронного пучка. Для металлодиэлектрического катода единственным элементом является тройная точка, которая создается различными способами. Обычно для получения тройной точки создается механический контакт металла с диэлектриком посредством металлической гребенки [2.8], сетки [2.5] или иглы [2.7].

Эксперименты проводились на модельном катоде (рис.2.1 и рис. 2.2). Исследовалось влияние промежутка анод–катод А и расстояния В, на которое диэлектрическая пластина 2 (стеклянная, шириной 20 и толщиной 2 мм) вдвигалась в промежуток анод–катод (за срез экрана катододержателя 1). С каждой стороны диэлектрической пластины имелась бронзовая гребенка 3 с пятью зубьями (ширина зуба 1мм, расстояние между зубьями 1 мм), утопленная от кромки катододержателя на расстояние С.

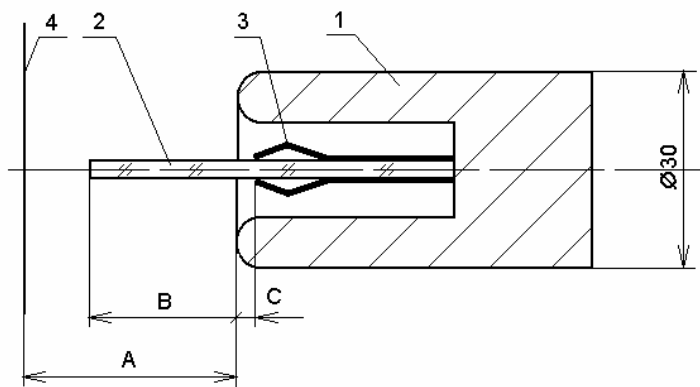


Рис.2.1. Конструкция катода:
 1- катододержатель, 2-диэлектрическая пластина, 3 – гребенка, 4- анод



Рис.2.2. МДМ-катод

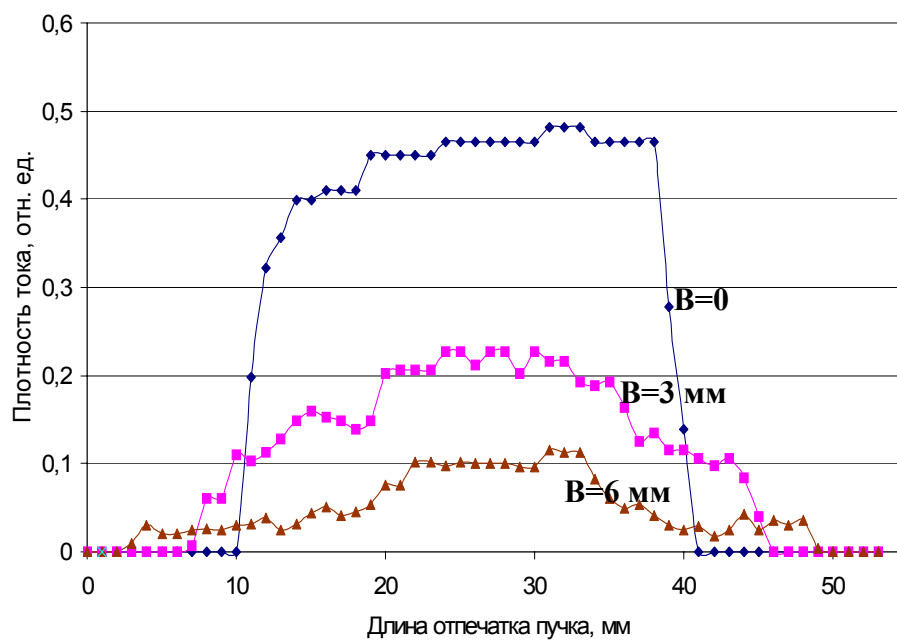


Рис. 2.3. Распределение плотности тока на аноде для промежутка катод–анод $A=10$ мм при различных значениях V

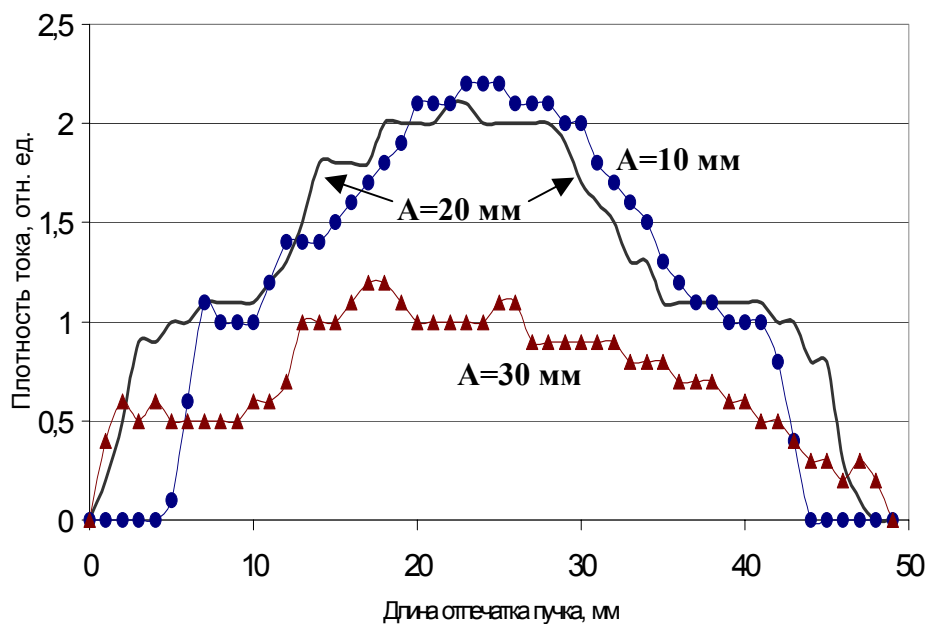


Рис. 2.4. Распределение плотности тока на аноде для $V=3$ мм, при различных значениях промежутка катод–анод A

В экспериментах измерялось напряжение на вакуумном диоде, с помощью омического делителя напряжения из резисторов ТВО. Напряжение регистрировалось на осциллографе «Tektronix TDS 620B». Временное разрешение канала регистрации проверялось подачей импульса напряжения с генератора СГС-54 (фронт 0,5 нс) и составляло 3,5 нс. Форма электронного пучка и распределение тока на аноде регистрировалась с помощью дозиметрических пленок типа ЦДП -2-Ф2 [2.18], которые плотно накладывались на выходную фольгу вакуумного диода. В измерениях использовался детектор с размером, позволяющим получить полный отпечаток пучка, если его размеры не превышали размеров выпускного окна (ширина 50 мм, длина 250 мм). Для каждого измерения подавалось 200 импульсов с частотой $f=10$ Гц. Отпечаток пучка денситометрировался на микрофотометре ИФО-463 (рис. 2.3, 2.4).

Исходя из найденной плотности тока и площади отпечатка пучка на детекторе рассчитывался полный ток пучка $I_{\text{по}}$, выведенного в атмосферу, и ток внутри вакуумного диода $I_{\text{пд}}$ (толщина выпускной алюминиевой фольги составляла 50 мкм) по методике [2.17] (см. главу 6). Результаты измерений сведены в табл. 2.1.

2.2.2. Экспериментальные данные

В процессе экспериментов установлено, что МДМ-катод, в котором для создания тройных точек используется бронзовая гребенка, может устойчиво работать с системой питания ускорителя на основе ППТ при относительно низком вакууме (до 10^{-2} Торр). Неустойчивая работа катода начинается при величине $B = -3$ мм (т.е. еще внутри катододержателя). Катод начинает работать устойчиво при значениях B в диапазоне от -3 до 0 мм. Отпечаток пучка на дозиметрической пленке – круг (рис. 2.5), диаметр которого пропорционально увеличивается при увеличении промежутка катод–анод A (Табл. 2.1). При дальнейшем выдвигании диэлектрической пластины в промежуток катод–анод (при фиксированном его значении) происходит уменьшение напряжения на диоде U и уменьшается импеданс диода R (рис. 2.6-2.9, табл. 2.1), при этом отпечаток пучка на дозиметрической пленке становится эллипсом (см. рис. 2.4).

Таблица 2.1. Экспериментальные данные

№	A, мм	B, мм	α , град	U_{max} , кВ	$t_{0,5}$, нс	$t_{фр}$, нс	a, мм	b, мм	S_n , см ²	D, Мрад	j, А/см ²	$I_{но}$, А	$I_{п1}$, А	R_d , кОм
1	20	-3	69	189	34	13	11	11	3,8	0,1	0,05	0,19	1,5	126,00
2	10	0	53	163	29,4	10	14	14	6,2	4,7	2,99	18,5	276,5	0,59
3	20	0	57	175	30	10,24	18,5	18,5	10,7	1,9	1,18	12,6	145,5	1,20
4	30	0	60	177	31	23	22,5	22,5	15,9	0,8	0,48	7,6	84,3	2,10
5	10	3	45	145	27	8,25	18,5	13	7,6	1,01	0,7	5,3	128,4	1,13
6	20	3	59	157	26	8,75	25	19	14,9	1,56	1,15	17,1	295	0,53
7	30	3	53	170	31	11	29	24,5	22,3	0,76	0,48	10,7	136	1,25
8	10	6	41	116	28,5	7,5	21	14,5	9,6	0,17	0,13	1,2	97,9	1,18
9	20	6	59	138	34	9	25	21,5	16,9	1,18	0,65	11,2	339,7	0,41
10	30	6	-	146	31,4	10	-	-	-	-	-	-	-	-
11	10	9	35	123	10	7	26	24	19,6	0,35	0,254	5	276,4	0,45
12	20	9	46	138	28	9	27,5	24	20,7	0,52	0,35	6,9	211,1	0,65
13	30	9	-	145	30	9,5	-	-	-	-	-	-	-	-
14	40	9	-	158	31	10,5	-	-	-	-	-	-	-	-
15	20	16	54	133	14	8,12	21	21,5	14,2	0,136	0,134	1,9	69,6	1,91
16	30	16	48	138	20	9	35	24,5	26,9	0,49	0,234	6,3	191	0,72
17	40	16	43	139	18,6	8,8	52,5	28,5	47	0,52	0,251	11,8	347,8	0,40
18	30	26	54	112	17	8,5	28	24	21,1	0,41	0,45	9,3	90,7	1,23

Примечание: A - расстояние катод-анод; B- расстояние, на которое диэлектрическая пластина вдвигалась в промежуток катод-анод; α – угол падения электронов на анод; U – максимальное напряжение; $t_{0,5}$ – длительность импульса на полувысоте; $t_{фр}$ –длительность переднего фронта импульса от уровня 0,1 до 0,9 от U; a, b – полуоси эллипса; S_n - площадь пучка; j- средняя плотность тока; D- поглощенная доза за 200 импульсов; $I_{но}$ - полный ток пучка, выведенный в атмосферу, $I_{п1}$ - внутри вакуумного диода, R_d , -импеданс вакуумного диода.

Отметим, что большая ось эллипса параллельна плоскости диэлектрической пластины, по боковым поверхностям которой идет разряд (есть следы на поверхности диэлектрической пластины, особенно при больших значениях B). Поворот пластины (вместе с катододержателем) на 90^0 привел к повороту большой оси эллипса (см. рис.2.5, $A=30$, $B=3$ – тень от каркаса выходного окна на отпечатке пучка перпендикулярна большой оси эллипса, тогда как на остальных отпечатках - параллельна). На отпечатке пучка хорошо видны локальные неоднородности, связанные с образом каналов разряда с зубьев гребенки (3, см. рис.2.1), которые сглаживаются при увеличении расстояния анод-катод.

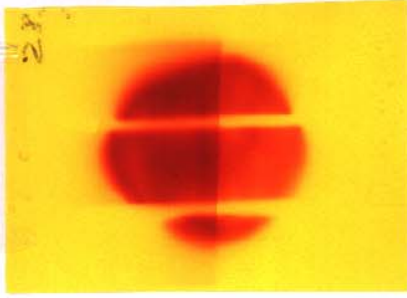
Кроме того, из полученных отпечатков можно определить угол падения электронов на детектор по величине тени, создаваемой каркасом выходного окна. Высота каркаса 6 мм, ширина перемычек 2 мм. Установлено, что при увеличении расстояния катод–анод углы α (см. табл. 2.1) увеличиваются (опыты № 2-4, 5-6, 8-9, 11-12, см. табл. 2.1), что говорит о неизменности положения точек эмиссии. Однако рост B ведет к уменьшению величины α , особенно при малых расстояниях A (опыты № 2, 5, 8 и 11), что указывает на выдвижение точек эмиссии в зазор катод–анод и подтверждает, что эмиссия электронов осуществляется из плазмы с поверхности диэлектрика. Отметим, что катододержатель (при $C=3,5$ мм) не затеняет путь электронов на анод вплоть до угла в 70^0 (см. рис. 2.1).

Когда значение B становится более половины величины промежутка катод–анод A (рис. 2.6, 2.7), происходит срезание заднего фронта импульса, а импеданс вакуумного диода возрастает (см. рис. 2.8). Скорость полученного среза фронта импульса может быть очень большой (см. рис. 2.6), в экспериментах полученное время фронта ограничивалось временным разрешением канала регистрации (7 нс). Экспериментальные данные показывают, что увеличение промежутка катод–анод A ведет к уменьшению степени влияния выдвижения диэлектрика в промежуток B (см. рис. 2.8,2.9, табл.2.1), в тоже время имеется уменьшение влияния выдвижения диэлектрика в промежуток B при одном и том же расстоянии катод–анод A .

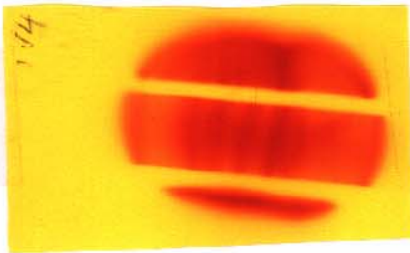
Выполнено изменение расположения точек контактов (C , см. рис. 2.1). Установлено, что при фиксированном расстоянии B изменение C заметно не влияет на параметры вакуумного диода. В большинстве экспериментов $C=3,5$ мм.

Пластина

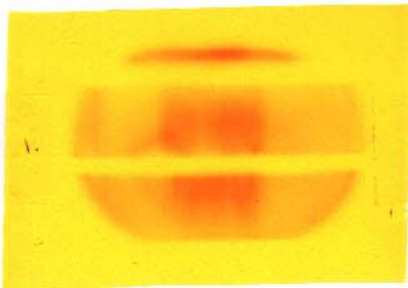
Анод-катод $A=10$ мм, $B=0$



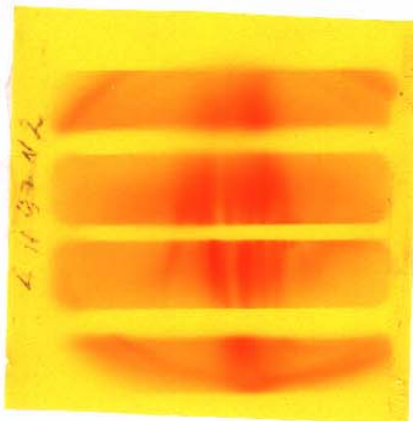
Анод-катод $A=10$ мм, $B=3$



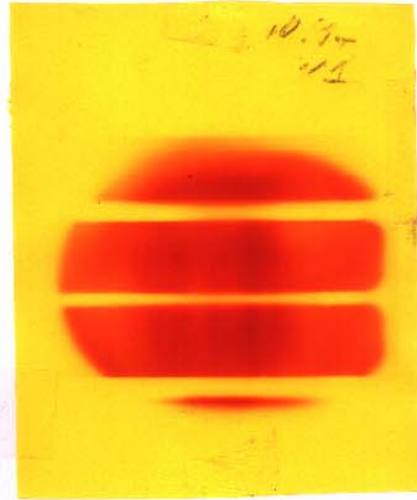
Анод-катод $A=10$ мм, $B=6$



Анод-катод $A=10$ мм, $B=9$



Анод-катод $A=20$ мм, $B=3$



Анод-катод $A=30$ мм, $B=3$



Рис. 2.5. Отпечатки пучка на детекторе (у отпечатка $A=10$ мм, $B=0$, половина детектора прикрыта алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм)

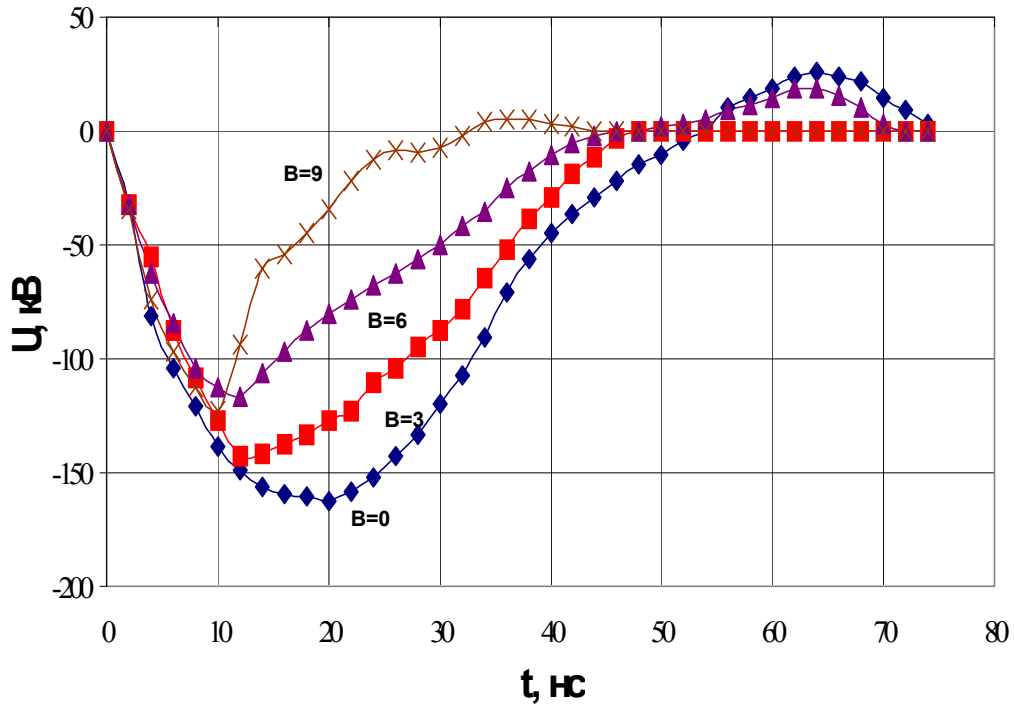


Рис.2.6. Форма ускоряющего напряжения для расстояния катод-анод $A = 10$ мм при различных значениях B

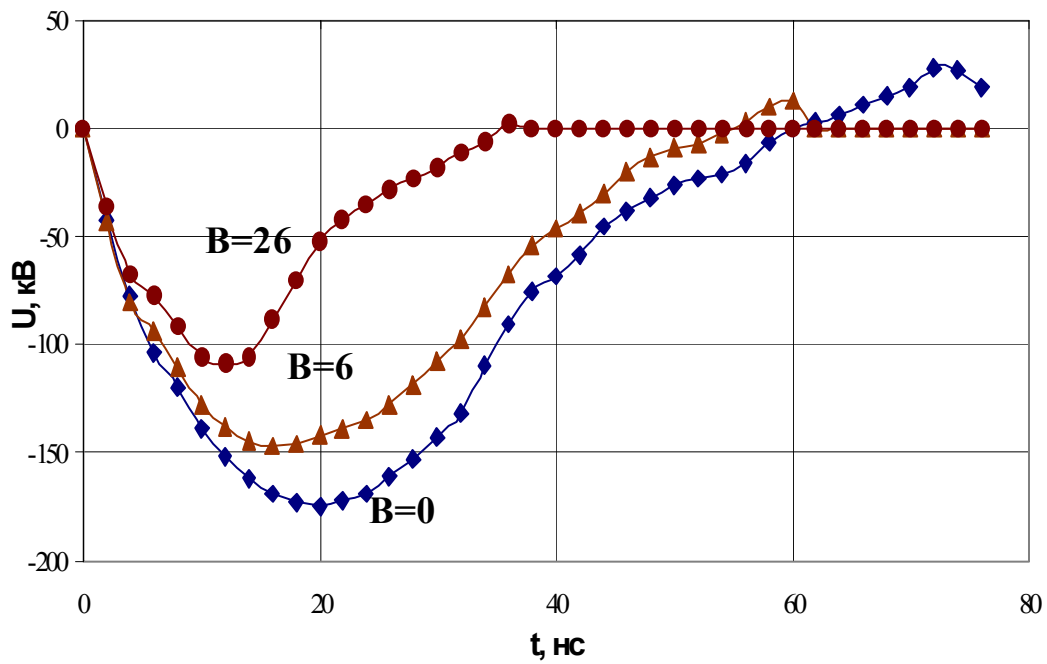


Рис.2.7. Форма ускоряющего напряжения для расстояния катод-анод $A = 30$ мм при различных значениях B

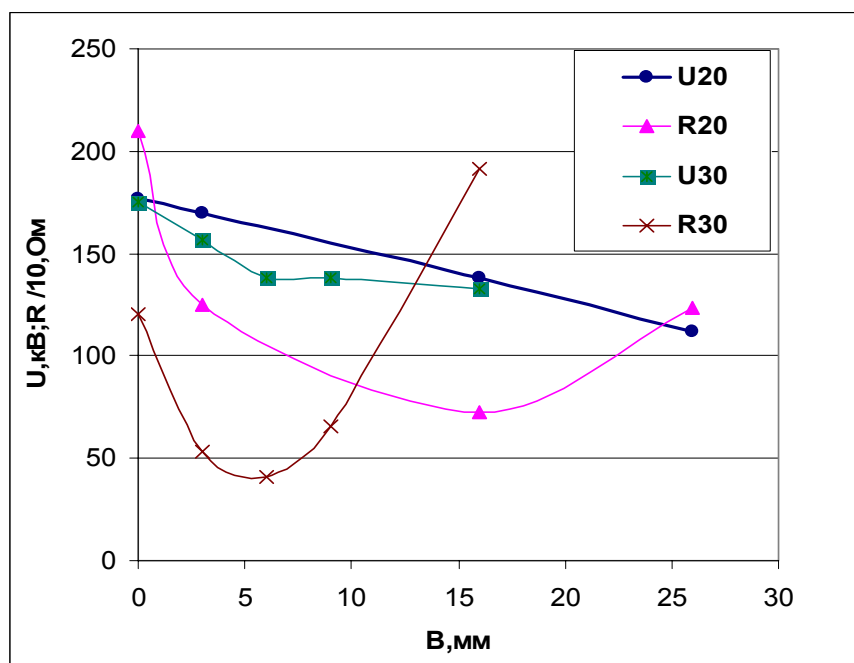


Рис.2.8. Зависимость ускоряющего напряжения U и импеданса вакуумного диода R для расстояния катод–анод $A=20$ и 30 мм при различных значениях B (цифры в легенде соответствуют значению A)

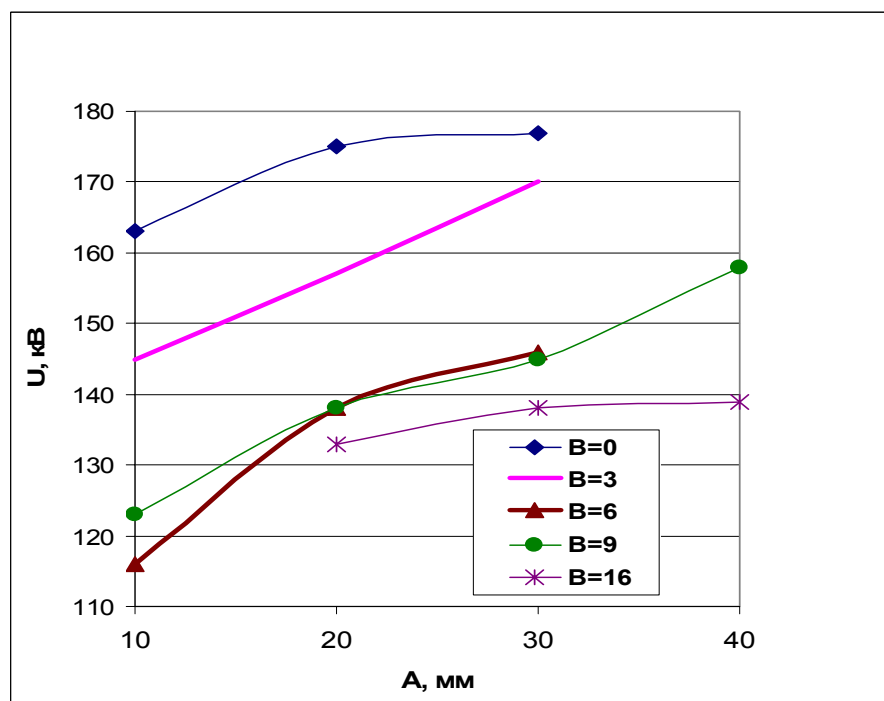


Рис.2.9. Зависимость ускоряющего напряжения от расстояния катод–анод при различных значениях B

Таким образом, в процессе экспериментов показано, что посредством изменения геометрии диэлектрической пластины можно регулировать не только ускоряющее напряжение и импеданс вакуумного диода, но и форму и размер формируемого пучка электронов, а также длительность импульса.

Укорочение импульсов возможно более чем вдвое (см. табл. 2.1). Кроме того, длительности наиболее коротких импульсов реально должны быть еще меньше, так как их длительность соизмерима с суммарным временным разрешением омического делителя напряжения и канала регистрации. Это неизбежно должно вести к уширению фронтов импульса при регистрации.

Известно, что разлет плазмы идет по поверхности диэлектрика и с отрывом от поверхности в вакуум (в работе [2.6] зафиксировано радиальное распространение плазмы от точки контакта металла с диэлектриком). Причем скорость движения плазмы разряда по поверхности диэлектрика существенно выше, чем в вакууме, и составляет 10^7 см/с [2.6]. Если начало движения плазмы совпадает с началом ускоряющего напряжения (или предимпульса), длительность импульса должна прямо зависеть от расстояния A , однако в эксперименте зависимость незначительная. Причем имеющаяся зависимость может быть объяснена увеличением либо индуктивности диода, либо амплитуды напряжения.

Полученные результаты по длительности импульсов (рис.2.10, см. табл. 2.1) можно объяснить, если принять, что скорость распространения плазмы вдоль поверхности диэлектрика в вакууме еще больше (до $4 \cdot 10^7$ см/с) и происходит ускорение плазмы при движении по принципу «снежного плуга». Средняя ее скорость, рассчитанная из времени переключения промежутка, зависит от длины диэлектрика, вдоль которой происходит разгон образующейся плазмы (рис. 2.11), ее рост приводит к более быстрому переключению одинакового вакуумного промежутка кромка пластины–анод (или $A-B=4$ мм), т.е. уменьшению длительности импульса с 30 до 10 нс, несмотря на большее значение расстояния катод–анод ($A=10$ и 30 мм, опыты № 8 и 18, см. табл. 2.1 соответственно). Отметим, что описанные режимы хорошо повторяются, вплоть до исследованной частоты работы ускорителя 250 Гц.

На основе полученного опыта созданы катоды, содержащие 8 и 18 контактных элементов (см. рис.2.10). Они расположены с шагом 25 мм, что исключает их влияние друг на друга [2.19]. Конструкция катода позволяла для каждого элемента независимо изменять расстояние B .

При расстоянии катод–анод $A=40$ мм выполнены эксперименты по настройке катода. Использовался детектор, позволяющий получить полный отпечаток пучка. Результаты измерений поглощенной дозы (плотности тока пучка) по большой оси сечения пучка представлены на рис. 2.11, соответствующие им параметры катода – в табл. 2.2. Они показывают возможность формирования практически любого профиля Распределения пучка электронов, что демонстрируется на рис. 2.13.

Табл. 2.2. Параметры 8 – элементного катода

№ опыта	Расстояние В для каждого элемента катода							
	1-ый	2-ый	3-ый	4-ый	5-ый	6-ый	7-ый	8-ый
1	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
2	3,5	3,5	4	3,5	4	3,5	3,5	3,5
3	3,5	5	4	4	6	4	4	3,5

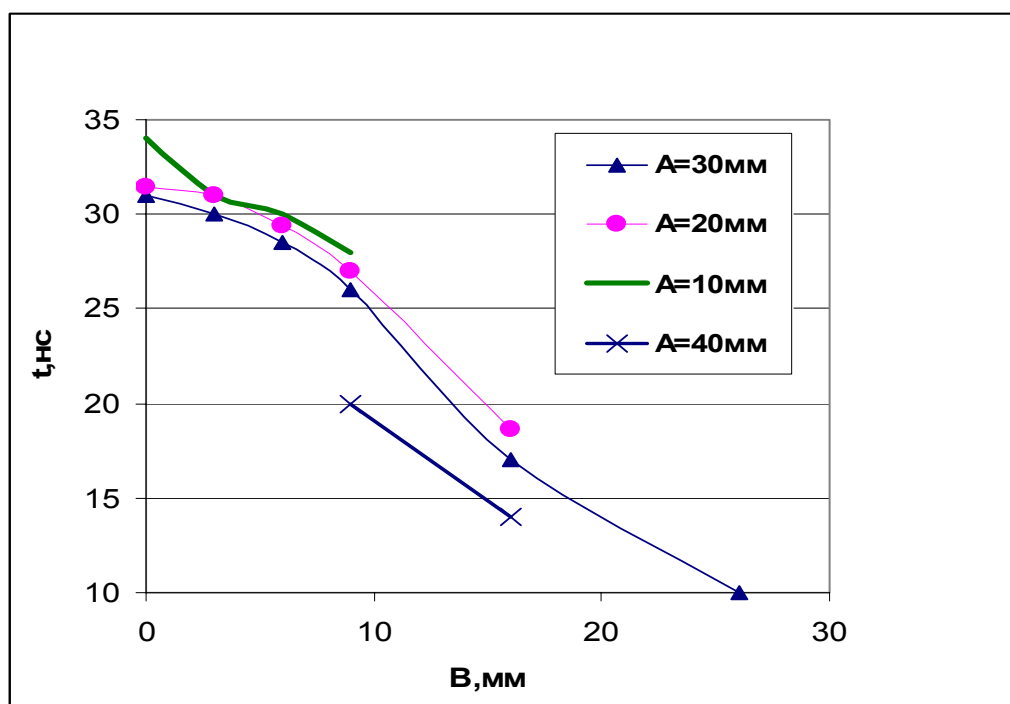


Рис.2.10. Зависимость длительности импульса от расстояния В для различных значений расстояния катод–анод А

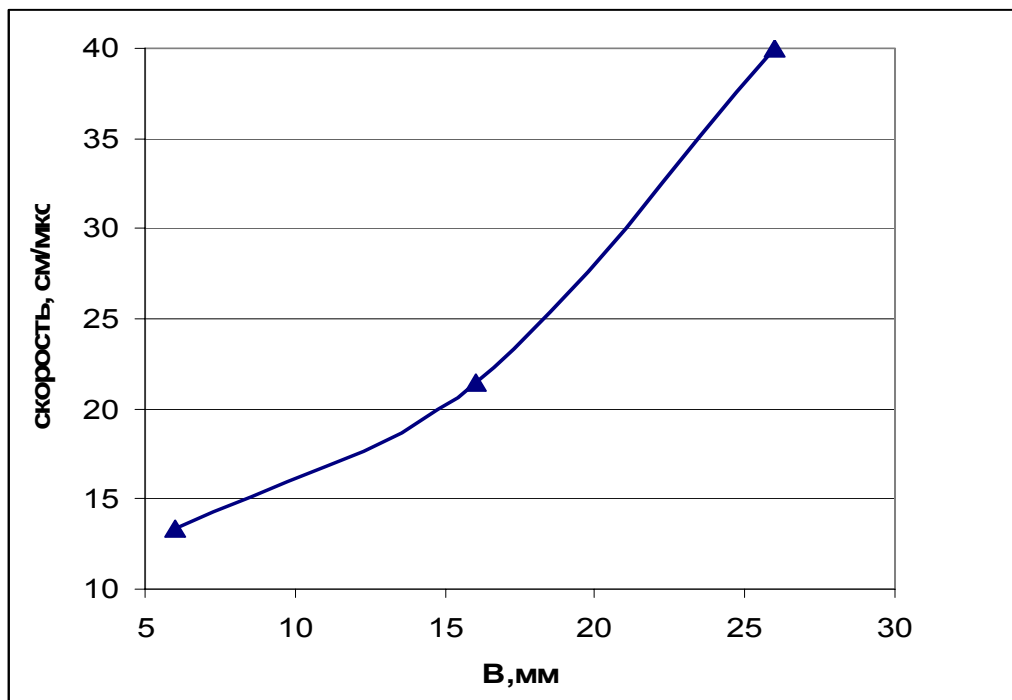


Рис.2.11. Зависимость скорости движения плазмы от расстояния В для значений А, при которых вакуумный промежуток от пластины до анода составляет А-В=4 мм

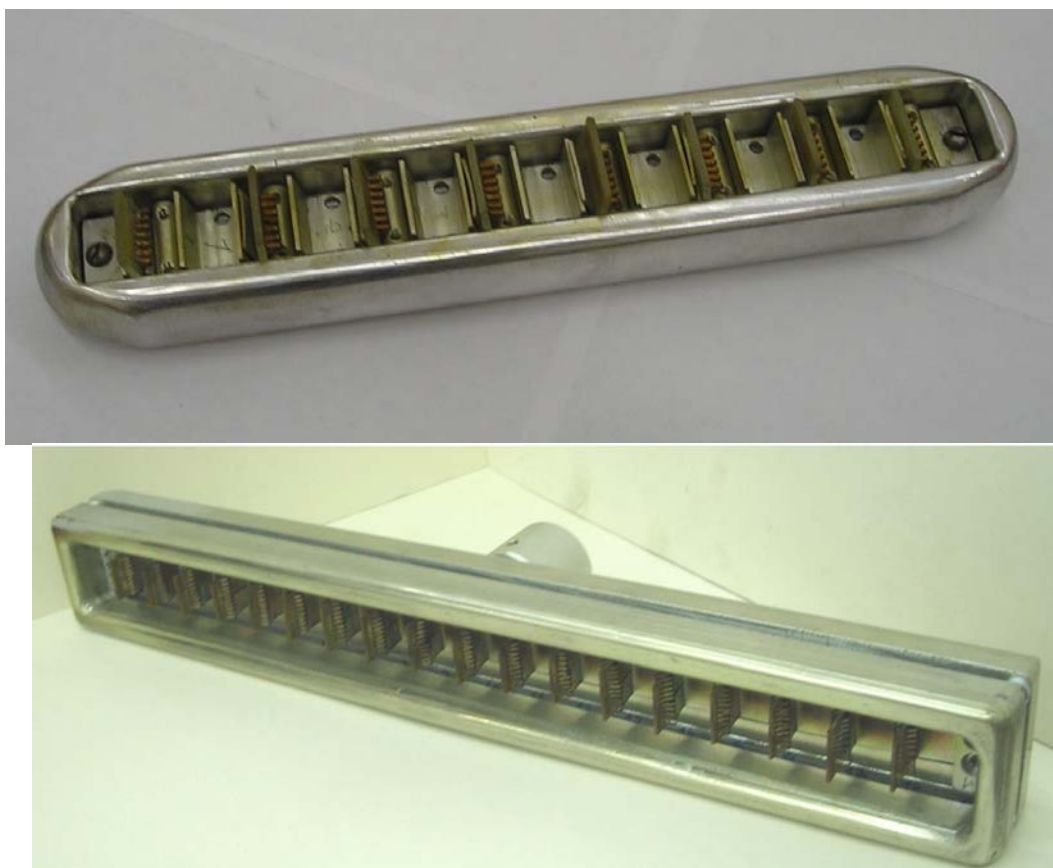


Рис.2.12. Катоды с 8 и 18 элементами

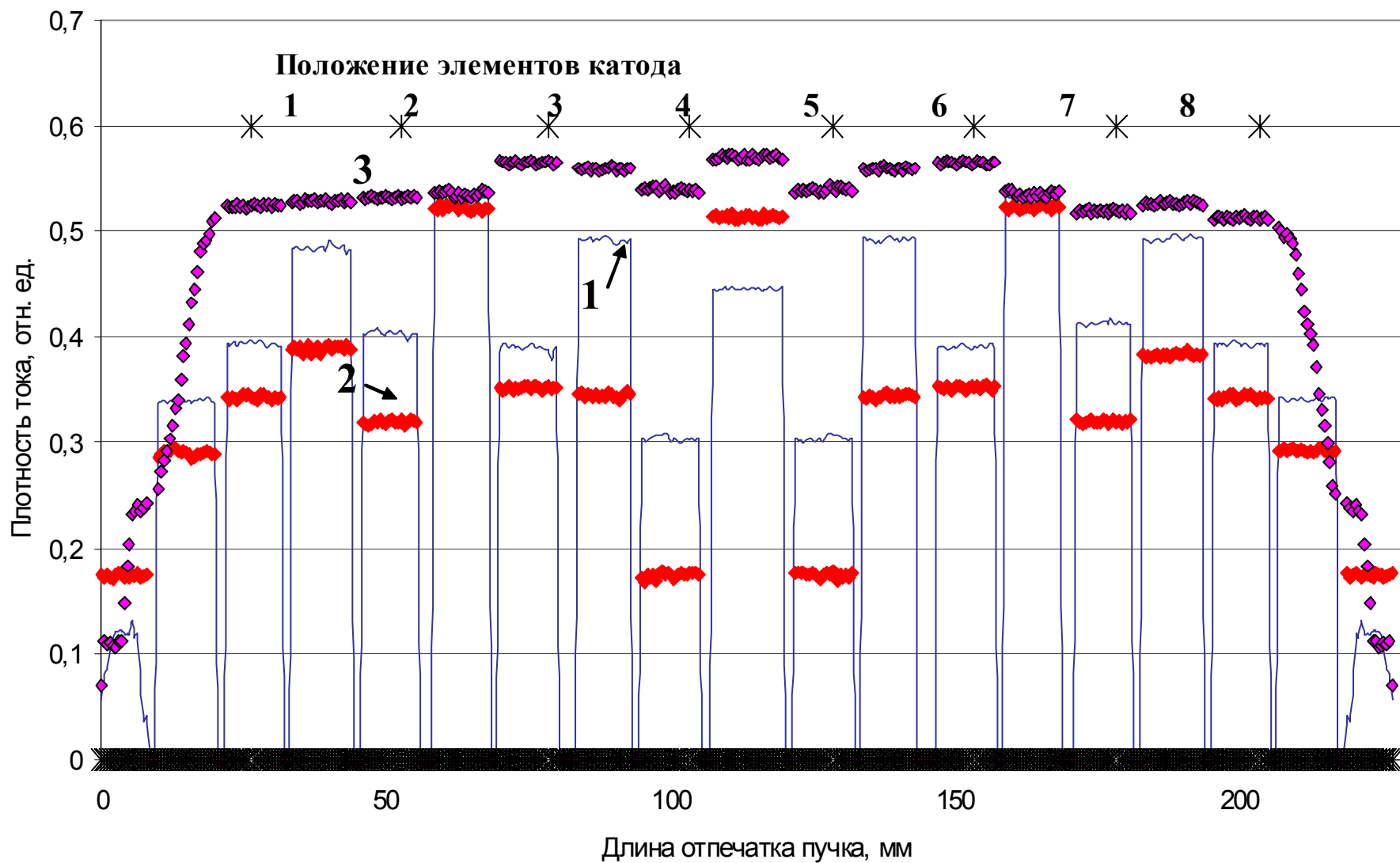


Рис.2.13. Распределение плотности тока на выходной фольге для различных положений элементов катода, приведенных в табл. 2.2 (провалы плотности тока соответствуют ребрам опорной решетки выходной фольги)

2.3. Исследования свечения плазмы МДМ–катода

Эксперименты проводились на ускорителе УРТ-0.5, ток пучка измерялся электрическим способом. Свечение плазмы измерялось с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 18ЭЛУфс через прозрачное (из оргстекла марки СОЛ) окно в вакуумной камере, находящееся напротив катода, и сигнал с рпн-диода (рис. 2.14). Выдвижение диэлектрической пластины из катододержателя, при фиксированном расстоянии катод–анод также приводит к увеличению тока и уменьшению напряжения на вакуумном диоде, при этом отпечаток пучка на дозиметрической пленке становится эллипсом, а дальнейшее увеличение V приводит не только к уменьшению напряжения, но и срезанию заднего фронта импульса (рис. 2.15).

Установлено, что существенное свечение плазмы (регистрируемое ФЭУ) появляется не на фронте, а на спаде тока, в момент начала пробоя вакуумного промежутка катод–анод. Существенно, что до момента появления свечения плазмы регистрируется тормозное излучение, что однозначно подтверждает наличие тока анода (см. рис. 2.14). Это говорит о том, что эмиссия электронов на катоде идет из относительно холодной и разреженной плазмы. Отметим, что описанная картина хорошо повторяется, вплоть до исследованной частоты работы ускорителя 200 Гц.

Вакуумный диод ускорителя УРТ-0,5 позволил исследовать работу МДМ–катода при большем диапазоне расстояний промежутка катод–анод A и установить его влияние на импеданс вакуумного и размер пучка (рис.2.16). При этом установлено, что уменьшение расстояния A приводит к росту пиковой мощности P_{\max} и уменьшению диаметра электронного пучка D (рис.2.17), что вызывает резкое увеличение плотности тока j (до 20 раз), т.е. термической нагрузки на выходную фольгу, что вместе с наличием локальных неоднородностей (см. рис. 2.5) должно ограничивать предельную частоту работы ускорителя. Таким образом, полученные данные позволяют выбирать геометрию катодного узла и вакуумного промежутка, а также режим работы ускорителя исходя из выбранного приложения.

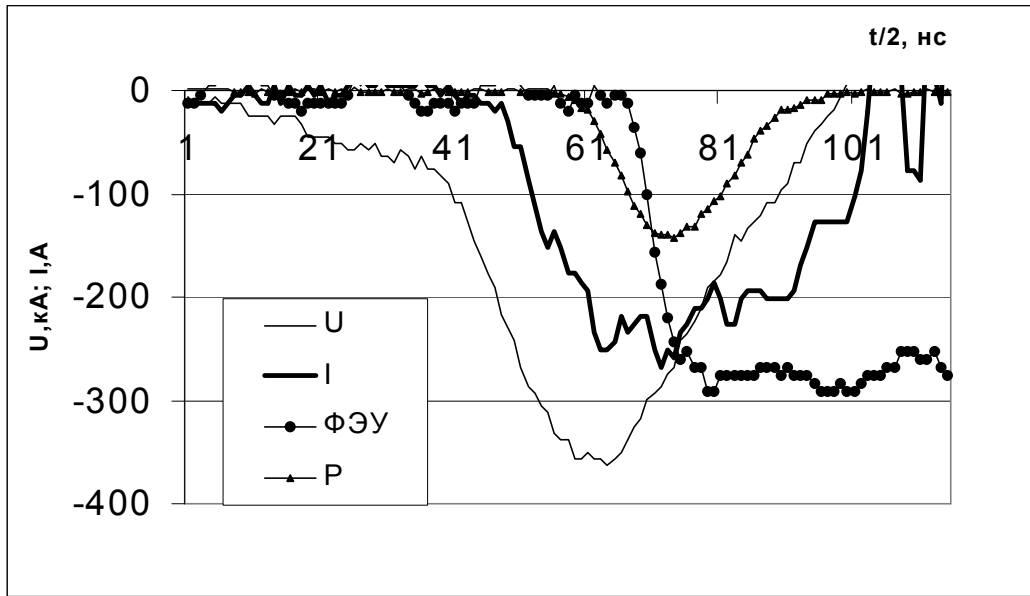


Рис. 2.14. Осциллограммы тока пучка, напряжения на вакуумном диоде, сигнал с ФЭУ и мощность дозы тормозного излучения Р при $A=47$ мм ($B=0$, $C=3,5$ мм)

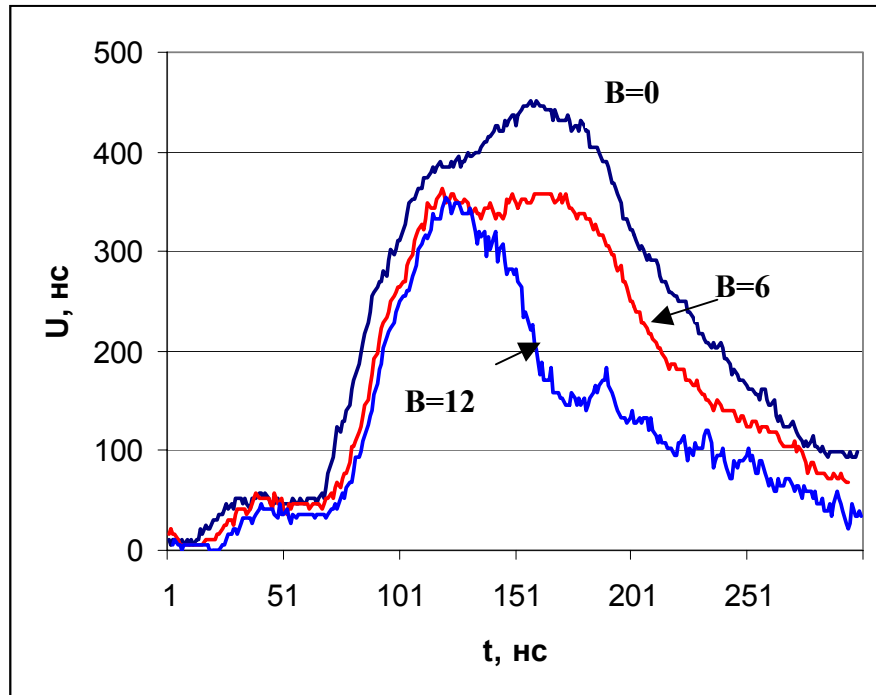


Рис. 2.15. Осциллограммы напряжения при различных расстояниях B ($C=3,5$, $A=20$ мм) для МДМ-катода

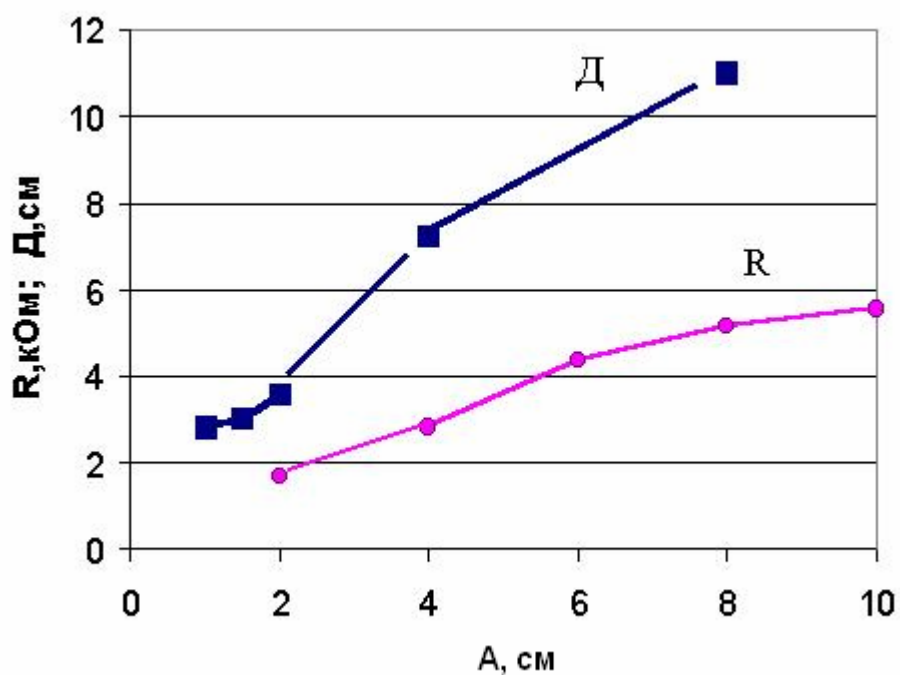


Рис. 2.16. Импеданс вакуумного диода в момент максимума напряжения и диаметр пучка электронов для различных расстояний A ($B=0$, $C=3,5$ мм)

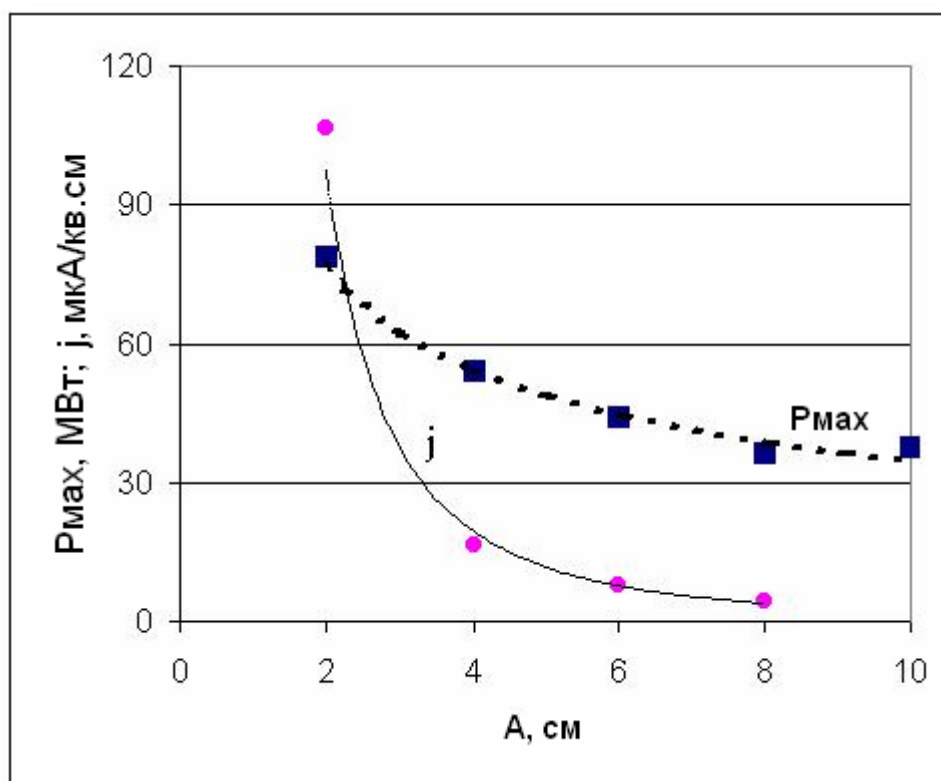


Рис. 2.17. Максимальная мощность в пучке электронов и плотность среднего тока при частоте 100 Гц для различных расстояний A ($B=0$, $C=3,5$ мм)

2.4. Выводы по главе 2

Установлено, что МДМ–катод, в котором для создания тройных точек используется бронзовая гребенка, может устойчиво работать при относительно низком вакууме $\sim 10^{-2}$ - 10^{-3} Торр, при уровне напряжений до 500 кВ и частоте до 250 Гц. Небольшое, относительно расстояния катод–анод, выдвижение диэлектрической пластины в промежуток катод–анод приводит к более устойчивому образованию плазмы на катоде при низком вакууме.

Найдено, что выдвижение диэлектрической пластины в промежуток катод–анод приводит к формированию пучка электронов с сечением в виде эллипса, что позволяет получать более равномерную плотность тока на мишени для катодов большой площади или формировать сложный профиль распределения пучка электронов на аноде при необходимости. Экспериментально показана возможность настройки катода, содержащего несколько излучающих элементов в целях получения однородной плотности тока ($\sim 10\%$) при большом сечении пучка.

Установлено наличие локальных неоднородностей распределения тока на аноде, связанных с усиленной эмиссией из плотной плазмы в каналах разряда с зубьев гребенки («образы каналов» на отпечатках). Неоднородности плотности тока на аноде сглаживаются при увеличении расстояния катод–анод.

Установлена возможность использования МДМ–катода для изменения длительности наносекундного электронного пучка, которое происходит за счет укорочения длительности заднего фронта импульса, связанного с пробоем вакуумного диода. Особенность механизма пробоя состоит в том, что происходит ускорение плазмы при ее движении вдоль поверхности диэлектрика на катоде, вызывающее сокращение длительности стадии пробоя (длительности заднего фронта).

Список литературы к главе 2

- 2.1 Месяц Г.А. Эктоны. Ч.1// Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. 184 С.
- 2.2 Krasik Ya. E., Dunaevsky A., Krokhmal A. et. al. Emission properties of different cathodes at $E < 10^5$ V/cm // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89, P. 2379-2399.
- 2.3 Gushenets V.I., Oks E.M., Yushkov G.Yu, Rempe N.G. Current Status of the Plasma Emission Electronics: I. Basic Physical Processes. // Laser and Particle Beams. 2003. Vol.21. No.2, P.123-138.
- 2.4 Бугаев С.П., Месяц Г.А. . Исследование механизма импульсного пробоя по поверхности диэлектрика в вакууме II. Неоднородное поле // ЖТФ. 1967. Т.37, Вып.10. С.1861-69.
- 2.5 Бугаев С.П., Загулов Ф.Я., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. Импульсный источник больших электронных токов малой длительности// Изв. вузов. Сер. Физика. 1968, Вып.1. С.145-147.
- 2.6 Бугаев С.П., Кремнев В.В., Терентьев Ю.И. и др. Скользящий разряд в вакууме по диэлектрику из титаната бария // ЖТФ. 1971. том XLI. Вып. 9. С. 1958-1962.
- 2.7 Бугаев С.П., Илюшкин В.А., Литвинов Е.А., Шпак В.Г. Взрывная эмиссия электронов из металлодиэлектрического катода // ЖТФ. 1973. Т.XLIII. вып.10. С. 2138-2142.
- 2.8 Загулов Ф.Я., Коровин С.Д., Кутенков О.П., Ландль В.Ф. Импульсный холодный катод// А.С. (СССР) № 1579321. кл. H 01 J 1//30, 1977.
- 2.9 Rosenman G., Shur D., Krasik Ya. E., Dunaevsky A. Electron emission from ferroelectrics // J. Appl. Phys. 2000. Vol. **88**. P. 6109-6161.
- 2.10 Krasik Ya. E., Dunaevsky A., Felsteiner J. Electron/ion emission from the plasma formed on the surface of ferroelectrics. II. Studies of electron diode operation with a ferroelectric plasma cathode // J. Appl. Phys. 1999. Vol.**85**, N 12, P.8474-8484.
- 2.11 Dunaevsky A., Krasik Ya. E., Felsteiner J., and S. Dorfman, A. Berner, and A. Sternlieb . Lifetime of ferroelectric cathodes // J. Appl. Phys. 2001. Vol.**89**, P.4480-4485
- 2.12 Einat M., Shur D., Jerbi E., Rosenman G. Lifetime of ferroelectric $\text{Pb}9\text{Zr,Ti}03$ ceramic cathodes with high current density // J. Appl. Phys. 2001. Vol.**89**, P. 548-552
- 2.13 Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.Л. Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов //ДАН. 1993. Т. 330, N 3. С. 315-317.
- 2.14 Kotov Yu.A., Mesyats G.A., Rukin S.N. et al. A novel nanosecond semiconductor opening switch for megavolt repetitive pulsed power technology: experiment and applica-

tions // Digest of 9-th IEEE Pulsed Power Conf., 1993, Albuquerque, New Mexico, USA, Vol.1, P. 134-139.

2.15 Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Семин Б.П., Шпак В.Г. Сильноточный наносекундный ускоритель для исследования быстропротекающих процессов // ПТЭ. 1981. №4. С.15-18.

2.16 Kotov Yu.A., Mesyats G.A., Korzhenevski S.R. et al. Compact repetitive electron beam and X-radiation generator // Proc. Of 10-th IEEE Pulsed Power Conference, 1995. Santa Fe, New Mexico, USA, July 10-13. Vol. 2, P. 1231-1234.

2.17 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,2, ПТЭ. 1997. № 4. С.84-86.

2.18 Генералова В.В., Гурский М.Н. Дозиметрия в радиационной технологии. М.: Изд-во стандартов, 1981.184 С.

2.19 Поляков Г.Ф., Новиков А.А., Широков Е.Г. Исследования электрических полей в системах с автоэлектронными эмиттерами методами моделирования // Изв. СО АН СССР, Сер. технических наук. 1966. № 2. Вып. 1. С. 154-158.