Глава 3. Металлокерамические катоды для наносекундных вакуумных диодов 3.1. Введение

МДМ-катоды, эксперименты с которыми рассмотрены в главе 2, к началу выполнения данной работы в наибольшей степени отвечали требованиям, предъявляемым к катодам для наносекундных ускорителей электронов (НУЭ). Однако МДМ-катоды имеют существенные недостатки:

- ограниченность числа точек эмиссии, что приводит к эрозии поджигающих электродов и диэлектрика под ними;
- неоднородности распределения тока на выходной фольге вакуумного диода (наличие образов разрядных каналов), особенно при малых расстояниях катод-анод;
- некоторую сложность конструкции, вызванную необходимостью создания нескольких тройных точек;
- достаточно высокий импеданс вакуумного диода при небольших размерах катодного узла.

Перечисленные недостатки стимулируют разработки других типов катодов для НУЭ. Мы предложили ликвидировать основной недостаток МДМ–катода путем увеличения числа тройных точек за счет использования на катоде композиционного материала, изготавливаемого из смеси нанопорошка диэлектрической матрицы и металлического порошка микронных размеров. Предполагалось, что применение нанопорошков позволит синтезировать материал при температуре ниже температуры плавления металлических частиц. В этом случае, при охлаждении, за счет разницы температурных коэффициентов линейного расширения, вокруг каждой частицы должны образоваться микрополости, что и обеспечит наличие тройных точек, плотность которых можно менять в широких пределах. Такие металлокерамические (МК) катоды были сделаны [3.1]. Результаты исследований эмиссионных характеристик, конструкции и анализ полученных результатов для МК– катодов представлены в данной главе.

3.2 Описание конструкции МК-катодов

В первых экспериментах использовалась конструкция МК–катода, представляющая собой металлокерамическую пластину 2 диаметром 12 мм и толщиной 2 мм (кромка пластины шлифовалась) обрезанную до высоты h = 10 мм (рис.3.1), приклеенную ребром к катододержателю 1 клеем "Суперклей" (или циокрин).



Рис.3.1. Конструкция МК-катода (две проекции): 1- катододержатель, 2 - керамическая пластина; 3 - анод



Рис.3.2. Конструкция МК-катода (две проекции): 1- катододержатель, 2 - керамическая пластина; 3 - анод



Рис.3.3. Металлические частицы (снимок получен на электронном микроскопе LEO 982)



Рис.3.4. Смесь диэлектрических и металлических частиц (снимок получен на электронном микроскопе LEO 982)

Для улучшения контакта в клей добавлялся медный порошок. Позднее конструкция МКкатода была усовершенствована (рис.3.2, 3.8). МК–пластина вставлялась в специальный пружинный зажим (цангу) на катододержателе, для улучшения контакта край пластины оборачивался фольгой из индия.

МК-пластины были изготовлены по специально разработанной технологии в лаборатории импульсных процессов Института электрофизики УрО РАН. Сферические частицы диаметром 26 мкм (в первых экспериментах, затем и другого размера, рис.3.3) из стали 12X18Н10Т были достаточно равномерно распределены (рис.3.4) в диэлектрической основе из нанопорошков Al₂O₃ с удельной поверхностью 80 г/м². Все порошки получены методом электрического взрыва проводников [3.2]. Порошки с заданным массовым соотношением перемешивались в изопропиловом спирте ультразвуком, с одновременным выпариванием до сметанообразного состояния. После этого смеси сушились и перемалывались в дисковой мельнице. Полученная смесь компактировалась электродинамическим способом и спекалась в лаборатории прикладной электродинамики ИЭФ УрО РАН. Использование нанопорошков диэлектрической основы позволило получить равномерное обволакивание металлических частиц частицами основы (рис.3.5), существенно снизить температуру спекания и избежать плавления металлических частиц. В результате были получены пластинки наноструктурной керамики с достаточно равномерно распределенными в её объеме и на поверхности металлическими частицами (рис. 3.6), вокруг каждой металлической частицы на поверхности образуется крупнозернистая структура с порами и трещинами (рис. 3.7).

3.3. Постановочные исследования МК-катодов

Для проведения экспериментов использовался частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5 [3.3] (см. главу 1).

В экспериментах измерялось: ускоряющее напряжение на вакуумном диоде, U_y, с помощью омического делителя напряжения, полный ток в вакуумном диоде, I_д, и ток, попадающий на анод вакуумного диода I_A, трансформатором тока, мощность поглощенной дозы тормозного излучения - pin-диодом СКД1-02. Временное разрешение всех электрических датчиков было не хуже 3 нс (pin-диода составляло 5 нс), сигналы с датчиков регистрировались на осциллографе «Tektronix TDE 360» с полосой 200 МГц.



Рис. 3.5. Металлическая частица в смеси диэлектрических и металлических частиц (снимок получен на электронном микроскопе LEO 982)



Рис.3.6. Поверхность МК-пластины (снимок получен на электронном микроскопе LEO 982)



Рис.3.7. Поверхность спеченной МК–пластины с металлической частицей покрытой керамикой (снимок получен на электронном микроскопе LEO 982)



Рис. 3.8. МК-катод

Форма сечения электронного пучка и распределение тока в нем регистрировались с помощью дозиметрических пленок типа ЦДП-2-Ф2 [3.4], которые плотно накладывались на выходную фольгу диода и обрабатывались на денситометре ИФО-463 после экспонирования. Расстояние катод–анод d=47 мм (см. рис. 3.1). Плотность частиц на поверхности в первых экспериментах составляла ~ 4300 см⁻¹.

Обработка полученных осциллограмм позволила установить, что имеется временная задержка t_3 (рис. 3.9) между приходом основного импульса напряжения и началом импульса тока, существенно большая, чем для МДМ–катодов. Установлено, что t_3 не изменяется в интервале расстояний катод–анод, d = 30÷90 мм, и составляет ~ 30 нс. После задержки ток и мощность электронного пучка нарастают с существенно большей скоростью в случае использования МДМ–катода.

Применение МК-катода приводит к увеличению скорости нарастания тока пучка электронов и выходной мощности Р ускорителя. Установлено также, что при постоянной скорости нарастания напряжения dU/dt ~ $5*10^{12}$ B/c величина di/dt достигает $3*10^{10}$ A/c в области максимума мощности рентгеновского излучения, d = 30 мм (рис. 3.10), а скорость нарастания мощности электронного пучка при этом составляет dP/dt ~ $2*10^{15}$ Br/c, тогда как с MДМ-катодами мы не получили di/dt > $5*10^9$ A/c и dP/dt > $2,5*10^{13}$ Br/c. Напряжение, соответствующее началу тока, практически не зависит от расстояния катод-анод в диапазоне d = 30-90 мм и составляет U ~250 кВ.

Из сопоставления зависимостей импеданса диода и мощности ускорителя, соответствующих моменту максимума тока (рис. 3.10), можно заключить, что импеданс вакуумного диода пропорционально увеличивается с d, а эмиссионная способность катода не ограничивает выходную мощность ускорителя. В области $d \le 30$ мм она достигла своего максимума (W=125 MBt), совпадающего с максимумом тормозного излучения. При меньших d ток продолжает нарастать за счет пропорционального снижения напряжения, а мощность остается практически неизменной (в некоторой области d), в отличие от МДМ– катода, ограничивающего мощность (рис 2.17) даже при малых расстояниях катод–анод.

Эксперименты показали хорошую воспроизводимость характеристик МК–катода и их неизменность, после небольшой тренировки, после наработки более 10⁸ импульсов.





Рис.3.9. Напряжение на вакуумном диоде, ток анода вакуумного диода и мощность поглощенной дозы тормозного излучения для различных значений расстояния анод-катод d для МК-катода.



Рис.3. 10. Импеданс R, выходная мощность W и мощность дозы тормозного излучения Р для различных расстояний d



Рис. 3.11. Интегральное распределение тока пучка электронов на анод при различных расстояниях d

Форма отпечатка пучка на детекторе представляет собой эллипс (соотношение осей ~5:7), большая ось которого совпадает с плоскостью МК–пластины. Распределения тока на аноде (по малой оси - рис. 3.11) показывают, что даже при относительно малых d пучок имеет неожиданно однородное распределение. При d = 10 мм плотность тока на аноде составляет 24,3 ± 8 % A/см². Однородность распределения тока на аноде возрастает с увеличением d. Обращает на себя внимание также достаточно резкая граница пучка и его большой относительно размеров катода размер. Полученные значения импульсной плотности тока на выходной фольге при длительной работе ускорителя при частоте 50 Гц близки к предельным значениям для используемой конструкции выходного окна [3.5].

3.4. Обсуждение результатов экспериментов с МК-катодом

Для изучения физического механизма работы МК-катода оценим напряженность электрического поля вблизи металлических частиц, вкрапленных в диэлектрик. Исходя из геометрии диода и катодного узла, представленной на рис. 3.1, можно полагать, что напряженность поля E_1 в керамике в нашем случае заключена между соответствующими величинами для диэлектрического шара во внешнем однородном поле и перпендикулярного диэлектрического цилиндра [3.6,3.7]:

$$\frac{3}{2\varepsilon+1} * \frac{U}{d+h} \rangle E_1 \rangle \frac{2}{\varepsilon+1} * \frac{U}{d+h}$$
(3.1)

Здесь є – относительная диэлектрическая постоянная керамики МК–пластины, U – напряжение на диоде. Размеры металлических частиц $\approx 10^{-3}$ см, поверхностная плотность выхода частиц 4,3·10³см⁻² и, следовательно, среднее расстояние между частицами $\approx 10^{-2}$ см. Из этих оценок следует, что частицы электростатически независимы. Поле вблизи частицы можно оценить как [3.6,3.7]:

$$E_2 = 3E_1 \cos\theta, \tag{3.2}$$

где θ - угол между направлением E₁ и радиус-вектором из центра частицы.

Как видно из осциллограмм напряжения и тока (см. рис. 3.8,3.9), резкий рост тока отстает от роста напряжения. Время запаздывания составляет ≈ 3.10⁻⁸с. В этой стадии величина тока мала и может быть обусловлена токами смещения в МК–пластине за счет достаточно высокой скорости нарастания напряжения. Резкий рост тока подразумевает одновременное возникновение проводящей среды (плазмы) на поверхности МК–пластины, которая обеспечивает высокую эмиссионную способность катода.

Токи смещения не могут обеспечить разрушения конденсированных сред, металла или диэлектрика до плазменного состояния, поскольку плотность тока смещения:

$$j_1 = (4\pi)^{-1} (dE_3 / dt) = (6\pi / (4\pi(\varepsilon + 1)))(d + h)^{-1} (dU / dt) \approx 0.58A / cM^2.$$
(3.3)

Невозможна также термоавтоэлектронная эмиссия с металлических частиц на поверхности МК-пластины, поскольку металлические частицы электрически изолированы в зарядовом отношении.

Для данной ситуации естественно предположить, что возникновение плазмы обусловлено развитием газового разряда в микропорах между диэлектриком и металлом, подобно тому, как описано в работах [3.8,3.9]. На это указывает сходство вольт- амперных характеристик МК-катода, построенных из осциллограмм (рис. 3.12) с характеристиками работ [3.8,3.9], а также величины напряженности электрического поля в микропорах $E_3=\epsilon E_2$ и ее зависимость от d (так называемый "эффект полного напряжения"), по нашим данным и данным работ [3.8], для момента начала резкого роста тока. Плазма, образующаяся в микропорах, выходящих на поверхность МК-пластины, может обеспечивать необходимую эмиссию электронов и электрический контакт с металлическим катододержателем.

Микропоры возникают в процессе приготовления МК-пластин за счет различия в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР). Для стали 12Х18Н10Т ТКЛР равен $23*10^{-6}$ K⁻¹ при 1300К и 17,6*10⁻⁶K⁻¹ при 373К, а для Al₂O₃ – 9,8·10⁻⁶ при 1400К и 8,1*10⁻⁶ K⁻¹ при 400К [3.10], т.е. отличаются более чем в 2 раза.

При остывании спеченной металлокерамики между металлическими частицами и керамикой возникают микропоры, заполненные газом, который и будет рабочим телом для образования плазмы при достижении на поверхности металлических частиц необходимой напряженности электрического поля. Исходя из приведенных выше цифр поперечные размеры микропор можно оценивать как $10^{-6} - 10^{-5}$ см, напряженность поля $E_3 \sim 6*10^5$ В/см, концентрацию газа $10^{19} - 10^{20}$ см⁻³.

Кроме того, из рис. 3.7 хорошо видно, что вокруг каждой металлической частицы на поверхности образуется крупнозернистая структура с порами и трещинами, которые также могут играть ту же роль.



Рис. 3.12. Вольт- амперные характеристики вакуумного диода с МК-катодом для различных расстояний d

3.5. Расширенные исследования свойств МК-катодов

Первые эксперименты показали, что испытанный тип катода обладает рядом привлекательных характеристик (обострение тока и повышение мощности, равномерное распределение тока, высокая эмиссионная способность), которые нуждаются в дальнейших исследованиях.

Далее исследовалось влияние состава МК–пластины на свойства МК–катода. Для этого изменялся размер металлических частиц D, их среднее количество на единице поверхности n₁, а также материал диэлектрической основы. В экспериментах использовалась усовершенствованная конструкция катодного узла (см. рис. 3.2).

Измерительная система осталась той же. Дополнительно регистрировалось интегральное распределение свечения плазмы на МК–пластине фотоаппаратом «Зенит-Е» с открытым затвором на фотопленке РФ-3 через прозрачное (из оргстекла марки СОЛ) окно в вакуумной камере, находящееся напротив МК–пластины. Параметры исследованных типов МК–пластин приведены в табл. 3.1. Для всех типов МК–катодов практически всегда имеется временная задержка t_3 начала тока в диоде относительно напряжения ([3.11], см. рис. 3.13, 3.14Б). Видно, что характер изменения t_3 от расстояния катод–анод d (расстояние от кромки керамической таблетки высотой h до плоскости анода – см. рис.3.1) остается одним и тем же: в области d ≤ 30 мм время задержки нарастает с увеличением d, в области же d ≥ 30 мм t_3 практически не изменяется с изменением d для всех типов исследованных катодов, что подтверждает эффект полного напряжения (см. раздел 3.3.3, [3.12]), обусловленный как геометрией электродов, так и десорбцией газа, особенно из микрополостей.

Для Al₂O₃ керамики t₃ слабо увеличивается с ростом плотности частиц на поверхности МК-катода (\mathbb{N} 1885 и \mathbb{N} 1889, табл. 3.2) и практически не зависит от размера частиц (\mathbb{N} \mathbb{N} 1885, II-1). При изменении же типа керамики с Al₂O₃ (относительная диэлектрическая постоянная $\varepsilon = 9,6$) на TiO₂ ($\varepsilon = 170$) t₃ возросла почти в 2 раза (\mathbb{N} II-I, и \mathbb{N} 1891). Такая зависимость свидетельствует о емкостном характере распределения напряжения в промежутке катододержатель–анод. Это указывает на коренное отличие рассматриваемого процесса от разряда вдоль поверхности диэлектрика в вакууме [3.13], где напряжение зажигания разряда и задержка появления тока разряда уменьшаются с ростом диэлектрической проницаемости и увеличением относительной высоты диэлектрической пластины в вакуумном зазоре.



Рис. 3.13. Временная задержка между приходом импульса напряжения и началом импульса тока для МК-катодов разного состава от расстояния катод –анод

		11	·· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
№ катода	Керамика	D, мкм	n, шт/см ²		
1885					
1886	Al ₂ O ₃	9	1900		
1887					
1888	Al ₂ O ₃	9	40000		
1889					
1890					
II-1	Al ₂ O ₃	26	4700		
1891					
1892	TiO ₂	9	4020		
1893					
1327	AI ₂ 0 ₃ +Mg0	Нет	нет		

Таблица 3.1. Исследованные типы МК-катодов





Рис. 3.14. Напряжение (для # 1891) и мощность в электронном пучке для различных катодов (А) и напряжения и ток для МДМ и МК–катода №1888 (Б) для расстояния d =47 мм.

Правильный выбор момента подключения нагрузки на этапе быстрого роста импеданса прерывателя тока любого типа позволяет улучшить условия работы прерывателя и увеличить выходную мощность [3.14]. Так как время обрыва тока используемого полупроводникового прерывателя лежит в пределах $\tau=30$ нс, увеличение t_3 приводит вначале к росту выходной мощности, а затем к ее уменьшению (см. табл. 3.2), когда $t_3>\tau$. В последнем случае максимум мощности достигается на заднем фронте напряжения (см. рис. 3.14А, №1891). Наблюдается практически линейная зависимость кпд передачи энергии от t_3 (см. табл. 3.2). Однако для МК–пластины №1891, где $t_3>\tau$., повышение кпд достигается за счет увеличения доли низкоэнергетичных электронов, формируемых на заднем фронте напряжения.

Максимум мощности ускорителя Р_м достигается при МК–катодах типа №1888-1890 (см. табл. 3.1) и в 2 раза превышает значение Р_м для МДМ–катода (см. рис. 3.14А, табл. 3.2). МК–катод позволяет получать существенно более высокие скорости нарастания тока, чем МДМ–катод (рис. 3.15 [3.11]). Так, в наших экспериментах при d=47 мм средняя скорость нарастания тока di/dt (от момента его начала до максимума напряжения) составляет 0,84 и 1,7*10¹⁰ A/c, а амплитуда тока 177 и 358 А для МДМ–катода и МК–катода №1888 соответственно. Одновременно происходит укорочение импульсов напряжения с 68 до 50 нс и тока с 92 до 44 нс (на полувысоте) для МДМ–катода и МК–катода №1888.

Так как скорости нарастания и амплитуды напряжения в обоих случаях очень близки (см. рис. 3.14Б), можно заключить, что МК–катод позволяет не только обострять, но и увеличивать выходную мощность ускорителя. Причиной, объясняющей этот эффект, может быть более высокая и нарастающая с большей скоростью эмиссионная способность МК–катода, обусловленная быстро увеличивающейся эмитирующей плазменной поверхностью и(или) высокой концентрацией плазмы.

Эксперименты показали хорошую воспроизводимость характеристик МК-катода и их неизменность, после небольшой тренировки, после наработки более 10⁸ импульсов. Однако, на пластинах с TiO₂ после наработки 10⁸ импульсов появлялись следы внедрения разряда в глубь керамики, что может в дальнейшем привести к изменению эмиссионных свойств.

№ катода	t ₃ , нс	Мощность, МВт	I, A	Энергия в пучке, Дж	Кпд передачи энер- гии в пучок, %
1891	40	155	428	6,73	30,3
1889	22	181	581	5,65	25,5
II-1	18	125	330	5,24	23,6
1885	14	137	556	4,97	22,4
МДМ	14	91	251	4,33	19,5

Табл. 3.2. Результаты экспериментов для d=47 мм

Чтобы наблюдать работу МК-катода без дуговой стадии, усложняющей интерпретацию экспериментальных данных, провели срез импульса напряжения за счет пробоя вакуумного изолятора [3.15] (изменения числа его секций, рис. 3.16). Фотопленкой при этом регистрируется только слабое свечение в точках контакта МК- пластины с катододержателем даже при наложении 30 импульсов на один кадр. Это позволяет сделать вывод о начале поверхностного разряда с одних и тех же точек контакта МК-пластины с катододержателем и о низкой концентрации плазмы на ее поверхности.

Все эти данные позволяют заключить, что плазма с низкой концентрацией появляется практически одновременно на большой площади пластины, что и объясняет высокую эмитирующую способность катода, а также высокий ресурс и хорошую воспроизводимость характеристик. Причиной появления плазмы на большой площади, видимо, является инициирование пробоя микропор у металлических частиц по МК–пластине.



Рис. 3.15. Скорость нарастания тока анода dI/dt вакуумного диода (средняя по фронту тока) для МК-катодов разного состава от расстояния катод-анод d.



Рис. 3.16. Ускоряющее напряжение (U1, U2 и U6), ток анода (I2 и I6) для разного количества секций вакуумного изолятора

3.6. Анализ характеристик МК-катодов

Анализ экспериментальных данных показал (табл. 3.3), что время задержки t₃ прямо пропорционально величине средней напряженности электрического поля E_{io} по поверхности МК–пластины между металлическими частицам и в момент начала тока в диоде, что маловероятно и позволило нам выдвинуть гипотезу [3.12] о том, что главные события развиваются не на поверхности МК–пластины, а в ее микропорах. Так, если металлические частицы имеют равный диаметр D, то t₃ обратно пропорциональна (см. табл. 3.3) средней напряженности поля Е_{МП} в микропоре шириной δ :

$$E_{M\Pi} = E_{io} / (n^{0.5} * 2^* \delta), \tag{3.5}$$

где n – плотность частиц на см², что не противоречит имеющимся представлениям.

Если в качестве параметра взять безразмерное напряжение:

$$U_0 = 1/(3, 14 * \varepsilon_0 * \varepsilon * n^{0.5} * D);$$
(3.6)

возникающее при зарядке одной частицы токами смещения при U_{io} (с учетом ее емкости и размера D), и построить зависимость средней напряженности поля в микропоре $E_{M\Pi}$ от этого параметра, обнаружим (рис. 3.17Б) что при уменьшении d зависимость переходит от практически линейной к логарифмической, что можно объяснить эффектом полного напряжения.

№ образца	t ₃ , ns	U _{io} ,ĸB	Еіо, кВ/см	Е _{МП} , кВ/см	U0	R _{max} ,Ом
1885	14	149	4,93	2669	9.56	985
II-1	18	200	6,64	790	2.10	1106
1890	22	246	8,14	960	2.08	1037
1891	40	376	0,77	287	0.37	2227

Таблица 3.3. Результаты расчетов и экспериментов для d=47 мм





Рис. 3.17. Зависимость напряженности поля $E_{\text{мп}}$ в микрополости от расстояния d (A) и от безразмерного напряжения U_0 при различных значениях d (Б).

По своей сути, параметр U_0 является обобщенной характеристикой эмиссионных свойств МК-пластины. Использование этого параметра позволяет объяснить близкие значения t_3 катодов с существенно разными характеристиками. Так, для катодов № II-1 и №1890 значение U_0 составляет 2,08 и 2,1, соответственно. Как видно (см. табл. 3.3) эти катоды имеют близкие значения t_3 .

Таким образом, можно прогнозировать свойства МК-катодов исходя из состава МК-пластин, используя полученные данные и параметр U₀ (рис. 3.18). Из полученного эмпирического соотношения:

$$t_3 = 28,655 * U_0^{-0.3237}$$
, (3.7)
 $U_{i0} = 289.72 U_0^{-0.2841}$,

можно оценить, что при увеличении диаметра частиц в МК–пластине №II-1 до D=50 мкм, t₃ составит около 28нс, а U_{i0} – около 280 кВ.

Важным параметром, определяющим свойства катода, является импеданс диода. Состав МК-пластин существенно влияет на импеданс вакуумного диода (в момент максимума напряжения, рис. 3.19). Желательно иметь возможность оценивать значение импеданса в момент максимума напряжения R_{max}, так как именно тогда формируется пучок максимальной энергии. Из экспериментальных данных видно (см. табл. 3.3), что имеется обратная зависимость R_{max} от параметра U₀, однако наиболее очевидна зависимость R_{max} от 1/E_{мп} (рис. 3.18Б), которая аппроксимируется выражением

$$R_{\text{max}} = 818,21\exp(279,7/E_{\text{MII}}). \tag{3.8}$$

Используя эту зависимость можно оценить, что при увеличении диаметра частиц в МКпластине №ІІ-1 до D=50 мкм величина Е_{мп} составит около 590 кВ/см, а R_{max}около 1300 Ом, т.е. эмиссионные свойства МК-катода снизятся.

Сказанное подтверждает, что распределение электрического поля до начала тока чисто емкостное, причем существенны как материал керамики, так и количество и размер металлических частиц, что в свою очередь означает, что в процессе участвует большинство частиц МК-пластины.



Рис. 3.18. Зависимости времени задержки t₃ от безразмерного напряжения U₀ (A) и импеданса R_{max} в момент максимума напряжения от напряженности поля E_{мп} в микрополости (Б), d=47мм.



Рис.3.19. Импеданс вакуумного диода (в момент максимума напряжения) для МК-катодов (А) разного состава и для МК-катодов с основой из Al₂O₃ (Б) от расстояния катод-анод d

3.7. Оптические исследования МК-катода

Форма разрядной плазмы на МК-пластине регистрировалась фотоаппаратом "Зенит-Е" с открытым затвором на фотопленке РФ-З через прозрачное (из оргстекла марки СОЛ) окно в вакуумной камере, находящееся напротив МК-пластины. Свечение плазмы измерялось с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 18ЭЛУфс, включенного по паспортной схеме с двумя источниками питания, через это же окошко. Движение плазмы по МК-пластине регистрировалась электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) СФ-Зм "Агат", при этом щель ЭОП (0,5 мм) юстировалась вдоль одной из поверхностей МКпластины ([3.16], см. рис. 3.20). Кроме того, были выполнены измерения спектра свечения плазмы, при этом между ФЭУ и окном вакуумной камеры устанавливался монохроматор СД-1. Регистрировался максимум сигнала на выбранной длине волны, за результат бралось усредненное по 128 импульсам значение.

Обработка полученных осциллограмм тока пучка электронов I, напряжения U и сигнала L с 18-ЭЛУ (рис. 3.22, 3.24) позволила установить, что свечение плазмы регистрируется на спаде тока в момент пробоя вакуумного промежутка катод–анод. Обработка полученных ЭОПограмм также показала, что свечение плазмы на поверхности МК-пластины появляется на заднем фронте тока (рис. 3.21, кривая S). Сигнал на кривой S на отметке 50 нс является технологической меткой. На ЭОПограмме виден уход плазмы из щели ЭОП, т.е. отрыв плазмы от поверхности МК–пластины со скоростью более 2.5 10^6 см/с (см. рис. 3.21, кривая S на отметке 150 нс). На этот провал сигнала на ЭОПограмме L1 (см. рис. 3.21) приходится максимум сигнала L с ФЭУ (рис. 3.22A). Сильное свечение плазмы завершающей стадии вакуумного пробоя. Важной особенностью является то, что свечение плазмы регистрируется ФЭУ на спаде тока, в момент начала пробоя вакуумного промежутка катод–анод. Существенно, что до момента регистрации свечения плазмы регистрируется тормозное излучение, что однозначно подтверждает наличие тока анода (рис. 3.24).

При организации среза тока вакуумной дуги за счет пробоя вакуумного изолятора (путем закорачивания секций изолятора, см. рис. 3.16) сигнал с ФЭУ отсутствует до момента максимума тока и появляется лишь в момент пробоя изолятора (рис. 3.22Б) за счет отраженного света от стенок камеры.

113



Рис.3.20. Оптическая схема (вид со стороны анода)



Рис. 3.21. Осциллограммы напряжения, тока анода и ЭОПограмма (S) для МК-катода





Рис. 3. 22. Осциллограммы тока пучка электронов, напряжения и сигнала с ФЭУ для нормального (А) и укороченного импульсов напряжения (Б)

На интегральных фотографиях МК-катода всегда регистрируется след разряда по МК-пластине, причем форма разряда (рис. 3.25) зависит от диэлектрической основы. На поверхности МК-катода из продуктов разложения вакуумного масла формируется образ разрядов, который хорошо виден (рис. 3.23). Однако при измерении свечения МК-пластины для укороченного импульса (см. рис. 3.22Б) приходится использовать наложение 30 импульсов в одном кадре, причем регистрируется как распределенное поверхностное свечение МК-пластины, так и слабые следы разряда в некоторых точках ее контакта с катододержателем. Отсутствие свечения поверхности МК-пластины до максимума тока, несмотря на значительную величину амплитуды и скорости нарастания отбираемого тока, позволяет заключить, что особенностью плазмы, возникающей на поверхности МК-пластины, является большая эмиссионная поверхность при низкой плотности, свечение которой не удается зарегистрировать ФЭУ.

Полученные результаты можно объяснить тем, что за счет различия в температурных коэффициентах линейного расширения при остывании спеченной металлокерамики между металлическими частицами и керамикой возникают микропоры с характерным размером 0,7 мкм, заполненные газом, который и служит для образования плазмы при достижении на поверхности металлических частиц необходимой напряженности электрического поля. Так как плотность частиц, выступающих на поверхность керамики, достаточно высока, то плотность плазмы может быть относительно низкой в целях обеспечения необходимой эмиссии электронов для выбранных параметров ускорителя. Наблюдаемое же всеми оптическими способами свечение плазмы связано с окончательной стадией вакуумного пробоя. Измерения показали, что спектр свечения МК–катода имеет несколько максимумов. В целом спектры подобны, имеют несколько одинаковых линий предположительно меди, железа и титана (табл. 3.4, рис. 3.26). Особенность спектра №1885 в том, что он имеет несколько широких пиков, которые трудно идентифицировать из-за их ширины (~20 нм).

Для МК–пластины №1892 можно предположить, что генерация плазмы происходит в процессе разряда, как из частиц нержавеющей стали, так и из материала основы керамики, причем предположительно видны следы сильно ионизированных ионов. Визуально это подтверждается внедрением канала разряда в МК–пластину. Однако, к сожалению, оказалось невозможно выполнить времязависимые измерения спектров, чтобы определить моменты появления ионов, что существенно для определения процесса, ответственного за эрозию МК пластины.

116



Рис. 3.23. Обе поверхности МК-пластины (№ІІ-1) после работы







Рис.3.24 Ускоряющее напряжение, ток анода, сигналы с pin-диода (P) и с ФЭУ (L) для различных МК-пластин



Рис. 3.25. Фотография разряда по МК–пластине для одного импульса, полученная фотоаппаратом с открытым затвором (d=47 мм): А – 1885; Б – 1891



Рис. 3.26. Спектры свечения плазмы для МК–пластин № 1885 и 1892, круги и треугольники соответственно

Регистрируемая ли-		Идентификация		Интенсив-	Примечания
ния	, HM	ли	нии	ность линии	-
№1885	№1892	НМ	Атом или	(по атласу)	
			ИОН		
301,8	301,8	301,08	Cu ¹⁺	2000	Из катододержателя
		300,727	Fe ³⁺	20	
		301,316	Fe ³⁺	20	Из нерж. Стали
326,8	326,8	326,688	Fe ³⁺	20	Из нерж. стали
		326,5	O^{3+}	10	?
		326,4	Fe ³⁺	9	Из нержавейки
-	341,8	340,738	O^{2+}	8	(слабый)
346,8	-	347,08	O^{2+}	8	
351,8	351,8	350,56	Fe ²⁺	15	
		350,48	Ti ²⁺	80	Из нержавейки
376,8	376,8	376,132	Ti ²⁺	200	(слабый)
400,8	-	399,8	Ti ¹⁺	100	
_	411,8	411,9	O^{2+}	8	
429,8	-	429,917	Fe ²⁺	10	
		430,00	Ti ²⁺	60	Из нерж. стали
461,8	-	465,1	Cu ¹⁺	2000	Широкий
467,8	-				Широкий
-	476,8	477,1	C ¹⁺	8	Слабый
_	478,8	478.343	O ⁴⁺	4	Из основы
		478.64	O ⁴⁺	20	
505,8	-	505,1	Cu ¹⁺	60	Широкий
508,8	-	510,5	Cu ²⁺	1500	Широкий
_	545,8	546.6	Si ²⁺	500	?
551,8	-				Широкий
556,8	-	555,7	Al ¹⁺	10	Широкий
596,8	596,8	596,2	Fe ²⁺	30	Из нерж. стали
651,8	651,8	649.49	Fe ¹⁺	1000	Из нерж. стали, широ-
					кий

Таблица 3.4. Результаты измерения спектра свечения

3.8. Исследование влияния площади МК-пластины на свойства вакуумного диода

Для практического использования МК-катода важно иметь возможность согласовывать эмиссионную способность катода и мощность ускорителя. Один из возможных путей – изменение площади эмиссии катода. Поэтому следующим шагом стало исследование влияния площади МК-пластины на свойства вакуумного диода на пластине №1890, при этом предварительно были выполнены измерения на целой пластине. Затем ее площадь уменьшена вдвое за счет обрезания краев, при этом из диска неправильной формы с меньшим диаметром 12.5 мм (большим - до 14 мм), зажатого краем в зажиме на глубину 2 мм, получилась практически прямоугольная пластина шириной 6 мм. Полученная МКпластина зажималась в цанговом зажиме катододержателя за короткую и длинную стороны, при этом пластина выступала в промежуток катод-анод на высоту 10 и 4 мм соответственно (табл. 3.5).

Обработкой экспериментальных данных установлено, что форма импульсов тока и напряжения, t₃ и скорость нарастания тока анода (рис.3.27), а также распределение тока на аноде практически не изменились, если МК–пластина зажималась за короткую сторону. Поведение расчетных кривых импеданса и первеанса осталось неизменным (рис.3.28).

Импеданс вакуумного диода с усеченной пластиной, зажатой за короткую сторону, уменьшился примерно на 10% на максимуме напряжения (рис.3.29) за счет увеличения тока анода. При этом удельная эмиссионная способность j₁ усеченной пластиной, зажатой за короткую сторону, была существенно выше (см. табл. 3.5) что может быть объяснено более полным использованием микрозазоров поверхности для создания плазмы и (или) включением в работу торцевых поверхностей.

Геометрия	Рабочая пло- щадь, см ²	t ₃ , нс	Мощность, МВт	I, A	j ₁ , А/см ²	кпд пере- дачи энер- гии в пу- чок, %
МК-пластина	1,22	22	166	498	408	25,5
Обрезанная МК– пластина закреплена за короткую сторону	0,71	22	132	366	515	22,3
Обрезанная МК– пластина закреплена за длинную сторону	0,52	46	55,6	197	379	12,2

Таблица 3.5. Результаты экспериментов с МК–пластиной №1890 различной площади для d=47 мм





Рис.3.27. Импульсы напряжения и тока анода МК–пластины №1890 полной Іа и усеченной Іа (s/2), зажатой за короткую сторону, для расстояния d=90 мм (A) и полной І1 и усеченной зажатой за короткую І2 и длинную І3 стороны при d=47 мм (Б)





Рис.3.28а. Рассчитанные из осциллограмм тока и напряжения кривые первеанса для полной и усеченной МК–пластины №1890 и ток анода для усеченной пластины Ia (s/2) (A) и кривые импеданса вакуумного диода для полной R и усеченной R(s/2) (Б) для расстояния d=90 мм.

Регистрируемая с помощью ФЭУ кривая интенсивности свечения плазмы изменилась. Свечение начинается на переднем фронте тока, причем амплитуда сигнала небольшая, но сомнения в его наличии нет, особенно при малых расстояниях катод–анод (d=10-30мм, рис.3.30), при больших – имеется, как и ранее, некоторая неопределенность в существовании. Причем при увеличении расстояния d свечение плазмы появляется раньше, если МК–пластина зажималась за короткую сторону. Этот участок на кривой интенсивности свечения, как бы "световой предымпульс", имеет более низкую амплитуду (на порядок), чем основной сигнал. Кроме того, интегральные фотографии показывают резкое увеличение свечения плазмы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что световой предымпульс говорит либо о наличии плазмы низкой плотности, либо о том, что она спрятана в микрозазорах.

В том случае, когда обрезанная МК–пластина крепилась за длинную сторону, существенно возросло время задержки, уменьшилась ее полная эмиссионная способность (рис. 3.27Б), что подтверждает влияние на начало эмиссии и удельную эмиссионную способность j₁ (см. табл. 3.5) напряженности электрического поля вдоль всей пластины, а не только в тройной точке контакта (метал–диэлектрик–вакуум) на катододержателе.

Существенное отличие усеченной пластины состоит в том, что на ней после 10⁵ импульсов следы контрагирования разряда вообще не появились (рис.3.31) в отличие от целой (см. рис.3.23). Это позволяет предположить более равномерное распределение эмиссии по поверхности усеченной МК-пластины, в силу более равномерного распределения напряжения.



Рис.3.29. Расчетные кривые импеданса вакуумного диода на максимуме напряжения для полной U_{max} и усеченной U_{max}(s/2) МК–пластины №1890 для различных расстояний d





Рис.3.30. Импульсы токов анода и сигналов с ФЭУ для полной Ia, L и усеченной Ia(s/2), L(s/2) МК-пластины №1890 для расстояния d=10 (A) и 30 мм (Б)



Рис. 3.31. Поверхность усеченной МК–пластины (№1890) после работы на 10⁶ импульсов (полоса соответствует линии зажатия в цанге катододержателя)

3.9. Исследования МК-катода с различными генераторами

ускоряющих импульсов

Для понимания областей применения МК-катода было важно сравнить его характеристики, при работе от различных систем питания, т.е. при различных формах ускоряющего напряжения. Особенность схем питания ускорителей с промежуточным индуктивным накопителем и ППТ состоит в том, что формируемый импульс высокого напряжения имеет короткий предымпульс с низкой амплитудой, тогда как схемы с емкостным накопителем формируют продолжительный предымпульс с достаточно большой амплитудой. Именно поэтому было важно проверить работу МК-катода с обеими системами питания.

Исследования МК-катода проводились на ускорителях УРТ-0,5 и TIS-300 [3.17] (ускоряющее напряжение U \leq 270 кВ, длительность импульса на полувысоте t_u ~ 250 нс, длительность фронта импульса напряжения $\tau_{\phi 0,1-0,9} = 15$ нс, частота срабатывания f \leq 10 Гц) с системой питания, созданной по схеме генератора Маркса. Конструкция катодного узла едина для обоих экспериментов (см. рис. 3.2). Во всех экспериментах использовался один и тот же МК-катод (№ 1893).

В экспериментах на ускорителе TIS-300 (Technion – Israel Institute of Technology) измерялось: ускоряющее напряжение на вакуумном диоде U омическим делителем напряжения, полный ток в вакуумном диоде I – с помощью пояса Роговского. Распределение плазмы на МК–пластине в двух проекциях регистрировалось полупроводниковой кадровой камерой «4Quik-05A» с временным разрешением 0,2 нс. Камера также использовалась для регистрации распределения тормозного излучения на задней стороне анода с помощью нанесенного сцинтиллятора Ga₂O₂S:Tb толщиной 200 мкг/см². Кроме того, для регистрации распределения тока пучка на аноде использовался коллимированный (диаметр отверстия 2 мм) секционированный цилиндр Фарадея (8 ячеек) и набор камер Обскура (12 отверстий диаметром 1 мм). Установлено, что МК–катод может успешно работать с обоими типами ускорителей, обеспечивая среднюю скорость нарастания тока 0,5 и $1*10^{10}$ A/с на ускорителях TIS-300 и УРТ-0,5 соответственно (рис. 3.32-3.34).



Рис.3.32. Осциллограммы тока и напряжения для ускорителяУРТ-0,5 (d=4,7 см)



Рис.3.33. Осциллограммы напряжения для ускорителя TIS-300(d_{ac}=2 и 4,5 см)



Рис.3.34. Осциллограммы тока для ускорителя TIS-300(d_{ac} =2 и 4,5 см)

Найдено, что имеется временное запаздывание t_3 начала тока в вакуумных диодах относительно начала основного фронта напряжения, которое составляет около 30 нс на ускорителе УРТ-0,5 (рис.3.32). На ускорителе TIS-300 временное запаздывание также есть, но благодаря тому, что имеется длинный предымпульс достаточно большой амплитуды (рис.3.33), оно приходится на предымпульс. В то же время на обоих ускорителях получено значение тока в вакуумном диоде, превышающее ограничение за счет пространственного заряда, составляющее [3.18]:

$$I_{SC} \cong 2.4 S_c U^{3/2} [\text{MB}] d_{AC}^{-2} [\text{cm}], \qquad (3.9)$$

где S_c – площадь катодной плазмы; U - ускоряющее напряжение, и d_{AC} – расстояние катод–анод (d на ускорителе УРТ-0,5).

Действительно, в экспериментах с ускорителем УРТ-0,5 амплитуда тока составляла I ≈ 150 A на максимуме напряжении U ≈ 440 кB (d=47 мм), в то время как расчетное значение I_{SC} ≤ 80 A, при S_c ≈ 2 см² (площадь поверхности МК платины). В экспериментах с ускорителем TIS-300 полученное значение тока составляло I ≈ 400 A на максимуме напряжении U ≈ 220 кB (d_{AC} =47 мм), тогда как расчетное значение I_{SC} ≤ 30 A. Кроме того, несмотря на уменьшение ускоряющего напряжения (рис.3.33), продолжается увеличение тока в вакуумном диоде. Это возможно при значительном уменьшении расстояния катод-анод за счет быстрого движения катодной плазмы в вакуумный промежуток в течение импульса ускоряющего напряжения.

Характер интегрального (по времени) распределения плазмы на МК–пластине, полученный на УРТ-0,5 (рис.3.25, для №1891), качественно совпадает с интегральным распределением, полученным на TIS-300 для №1893 (такого же состава, см. табл. 3.1).

Результаты съемок полупроводниковой кадровой камерой «4Quik-05A» (в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, рис.3.35) показывают, что начало свечения плазмы совпадает на ускорителе TIS-300 с предымпульсом напряжения (при U=10-20 кВ, средняя напряженность электрического поля на зазоре $E \le 5$ кВ/см, при скорости роста напряженности электрического поля dE/dt ~ 1.5×10^{12} B/(см*с)), тогда как для ускорителя УРТ-0,5 имеется временное запаздывание, совпадающее с временем запаздывания тока пучка t₃ (рис. 3.36). Установлено, что плазма появляется в местах контакта с катододержателем (тройных точках, см. рис.3.35). Затем разрядная плазма узкой полосой быстро распространяется вдоль МК–пластины, достигает ее края и далее уходит в вакуумный зазор. При увеличении напряжения на микроканальной пластине кадровой камеры «4Quik-05A» (т.е. увеличении чувствительности) свечение небольшой яркости



Рис. 3.35. Результаты съемок полупроводниковой кадровой камерой «4Quik-05А» (в двух взаимно перпендикулярных плоскостях)



Рис.3.36. Осциллограммы напряжения, тока и сигнала с ФЭУ для катода №1893 на ускорителе УРТ-0,5 (d=47 мм)



Рис. 3.37. Импеданс вакуумного диода ускорителя TIS-300, рассчитанный из осциллограмм тока и напряжения при различных значениях d_{AC}



Рис.3.38. Расчетные значения первеансов (I/U^{1.5})

наблюдается во многих точках пластины. Это позволяет говорить, что эмиссия идет из плазмы, которая формируется за счет пробойных процессов (в микропорах).

Результаты расчета импеданса вакуумного диода из осциллограмм тока и напряжения при различных значениях d_{AC} (рис. 3.37) показывают существенное уменьшение импеданса в течение импульса напряжения, которое можно объяснить быстрым расширением катодной плазмы. Скорость движения границы плазмы в промежутке катод– анод оценивалась по осциллограммам импульсов напряжения (см. рис. 3.34) из предположения, что конец импульса соответствует перемыканию промежутка d_{AC} . Расчеты показали, что при увеличении скорости роста ускоряющего напряжения dU/dt в одном и том же промежутке катод–анод происходит увеличение скорости движения плазмы. Например, для $d_{AC} = 2$ см и 4.5 см скорость расширения плазмы составляла $V_{pl} \approx 10^7$ см/с и 1.4×10^7 см/с для dU/dt = 3.4×10^{12} B/c, dU/dt = 6.4×10^{12} B/c, соответственно. При этом рассчитанная скорость расширения плазмы примерно в 5 раз больше, чем при взрывной эмиссии [3.19].

На основе измеренной скорости движения плазмы построены графики первеансов как функции vt/(d-vt) (рис. 3.38). Это позволило установить зависимость между током и напряжением для вакуумных диодов (по методике [3.19], в которой плазма имеет сферическую поверхность и неограниченную эмиссионную способность) и выполнить расчеты токов (рис.3.39), хорошо совпадающих с экспериментом до момента пробоя. Отметим, что для ускорителя УРТ-0,5 первеанс имеет существенно нелинейную зависимость (степенная функция 4-го порядка), что говорит о зависимости эмитирующей поверхности от приложенного напряжения [3.19]. Первеанс вакуумного диода ускорителя TIS-300 сохраняет линейность вплоть до момента прохода функции vt/(d-vt) через ноль (т.е. «перемыкания» промежутка). На осциллограмме тока этому моменту соответствует резкое увеличение производной, а на снимках камеры «4Quik-05A» увеличение яркости плазменного столба (см. рис.3.35).

Размеры пучка для обоих ускорителей близки для одинаковых расстояний катод– анод (при d=10 мм составляют около 60 мм). Распределение плотности тока существенно различное: для ускорителя УРТ-0,5 даже при относительно малых расстояниях катод– анод d оно имеет резкие границы, а флуктуации плотности не превышают 8 % при d = 10 мм и уменьшаются с увеличением d, в то время как для ускорителя TIS-300 характерно гауссово распределение плотности (рис. 3.40).





Рис. 3.39. Осциллограммы напряжения, тока и расчета тока I_{cal} для ускорителя TIS-300(А) и УТР-0,5 (Б)



Рис. 3.40. Распределение плотности тока на выходной фольге ускорителя TIS-300

Как видно, результаты экспериментов имеют много общего. Расхождения в распределении плотности тока на аноде можно объяснить объективными отличиями в условиях экспериментов. Большая длительность предымпульса на ускорителе TIS-300 обуславливает более раннее образование плазмы, что и приводит к меньшему значению t₃ и линейности первеанса, т.е. отсутствию зависимости эмитирующей поверхности от приложенного напряжения.

Более раннее образование, высокая скорость движения плазмы и существенно большая длительность импульса вызывает быстрое перекрытие расстояния катод–анод вакуумного диода на ускорителе TIS-300, формирование ионного тока, компенсирующего объемный заряд электронного пучка, и стягивание электронного тока к оси. Это и приводит к формированию гауссова распределения плотности тока на аноде.

Аномально высокая скорость движения плазмы может быть объяснена тем, что после ее зарождения у катододержателя происходит инициирование последовательного пробоя микропор у металлических частиц (по МК–пластине). На это указывает существенная неоднородность плазмы на поверхности МК–пластины и наличие в ней разрывов на фронте напряжения (рис.3.35). Дальнейшее быстрое распространение плазмы в вакуум от поверхности МК (под углом около 55⁰, 125нс см. рис. 3.35) можно объяснить, например, ударной ионизацией электронами остаточного газа (в том числе исходящего из пор МК– пластины) либо движением плазмы в направлении максимума силовых линий электрического поля, предполагая его выход на внешнюю кромку МК–пластины после первичного последовательного пробоя промежутков. Подтверждением этому является совпадение угла распространения плазмы и падения электронов на анод, измеренного по отпечатку пучка.

Таким образом, эксперименты показали, что МК-катод может использоваться с емкостными схемами питания, обеспечивать однородное распределение тока пучка электронов на выходе вакуумного диода, когда длительность импульса меньше времени перемыкания плазменного промежутка.

3.10. Экранированный МК-катод

Как было показано, использование МК-катода приводит к уменьшению импеданса вакуумного диода по сравнению с МДМ–катодом тех же размеров. Для увеличения импеданса путем уменьшения расходимости пучка электронов в МК-катоде применена экранировка МК-пластины (рис. 3.41 и 3.42). Исследовано влияние геометрии такого катода на характеристики вакуумного диода [3.20]. В экспериментах изменялось расстояние вылета МК-пластины в промежуток катод–анод В (в диапазоне -6...6 мм), а также диаметры экрана. При этом использовались экраны с внешними диаметрами 30 и 40 мм и внутренними 20 и 30 мм соответственно.

Установлено, что при фиксированном расстоянии катод–анод d=57 мм и выдвижении МК-пластины в промежуток (рост В) амплитуда импульса ускоряющего напряжения практически линейно падает, а ток пучка увеличивается (рис. 3.43), причем уменьшение напряжения происходит достаточно медленно, в то время как значение тока изменяется быстро и существенно, в несколько раз. Для сравнения на рис. 3.43 показаны штриховыми линиями уровни напряжения для катодов без МК-пластины (линия 1) и без экрана (линия 2).

Скорее всего, резкий рост тока при выдвижении МК-пластины в промежуток катод–анод связан с ослаблением влияния экрана на распределение электрического поля по МК–пластине. При этом импеданс вакуумного диода быстро падает с увеличением В от -6 мм до 0, затем остается примерно постоянным. При В > 3 мм ток начинает быстро нарастать.

137



Рис. 3.41. Конструкция МК-катода с экраном: 1-экранирующий электрод (экран), 2-МК-пластина, 3-анод, D1 и D2-наружный и внутренний диаметры экрана



Рис. 3.42. МК-катод с экраном



Рис. 3.43. Зависимости напряжения (U), тока (i), мощности (P) и импеданса (Z) от вылета МК-пластины (B) из экрана



Рис. 3.44. Распределения тока на аноде при разных вылетах МК-пластины В и разных размерах экрана (D1/D2). 1 – (-3, 40/30); 2 – (-3, 30/20); 3 – (0, 30/20)

Форма отпечатка пучка на детекторе для МК-катода с экраном имеет вид эллипса с соотношением осей 5:4, аналогично МДМ-катоду. При этом большая полуось также совпадает с плоскостью МК-пластины. Пучок практически однородный в центре, однако, на границе пучка плотность тока в несколько раз превышает среднее значение. На рис. 3.44 показаны распределения тока на аноде вдоль большой оси (для d=57 мм) при разных размерах экранирующего электрода и разных вылетах В. Отметим, что имеющаяся неоднородность пучка МК-катода с экраном не сказывается на стойкости выходной фольги, так как нет резких флуктуаций плотности, как в случае МДМ-катода.

Установлено, что размер пучка растет с увеличением размеров экрана (при постоянном В) либо при выдвижении пластины в промежуток (при фиксированных размерах экрана). Очень важно для некоторых приложений, что при фиксированных размерах экрана и постоянном В размер пучка практически не зависит от расстояния катод–анод d, в то время как для МК–катода без экрана размер пучка меняется более чем в 2 раза [3.12]. Наиболее вероятная причина данного эффекта – изменение экраном направления электрического поля вдоль МК–пластины, приводящее к фокусированию эмитированных из плазмы электронов.

Результаты экспериментов показывают, что применение МК-катода с экраном позволяет существенно повысить импеданс вакуумного диода, управлять мощностью (табл. 3.6) и размерами пучка электронов. Необходимо отметить, что МК-катод с экраном устойчиво работает при изменении В во всем исследованном диапазоне, при этом стабильность характеристик находится в пределах погрешности измерений.

На основе полученных данных были созданы МК-катоды большого размера для получения пучка электронов шириной 200 и 400 мм, которые содержали 9 и 19 МКпластин, соответственно (рис. 3.46), расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (20 мм). Однако измерение распределения тока на аноде (по дозиметрической методике) для таких катодов показало (рис. 3.47), что получить однородное распределение плотности тока очень сложно, даже путем точного регулирования положения каждой МК-пластины (В – см. рис. 3.41).

В тоже время удачным оказался подход, когда МК–пластины были установлены на большом расстоянии друг от друга (рис. 3.48). В этом случае появилась возможность управлять распределением тока на аноде посредством изменения расстояния между пластинами (рис. 3.49).

140



Рис. 3.46. МК катоды со множеством МК пластин.



Рис. 3.47. Распределения поглощенной дозы (плотность тока) на аноде при разных положениях МК-пластин относительно экрана (В – см. рис. 3.41).



Рис. 3.48. МК катод с двумя МК пластинами.



Рис. 3.49. Распределения поглощенной дозы (плотность тока) на аноде при разных расстояниях между МК-пластинами.

L _{доп.} , мкГн	МДМ-катод			МК-катод			МК-катод с экраном		
	U,ĸB	I _M ,A	Р _м ,МВт	U,ĸB	I _M ,A	Р _м ,МВт	U,ĸB	I _M ,A	Р _м ,МВт
0	395	131	52	334	329	109	386	144	55
2,5	359	67	24	307	214	65	389	103	40
7,8	448	189	84	366	363	132	506	181	91
9,3	477	202	96	360	394	141	530	230	121
14,5	439	233	102	339	364	123	520	226	117

Таблица 3.6. Данные для различных катодов для УРТ-0,5

Примечание: *I_м, P_м амплитуды тока пучка и мощности в пучке на максимуме напряже*ния.

3.11. Выводы по главе 3

Полученные результаты показывают, что предложенный МК-катод может работать с системами питания различных типов и обладает рядом важных для эксплуатации технологических ускорителей характеристик:

- Имеет повышенную эмиссионную способность при относительно небольших значениях напряженности электрического поля в вакуумном диоде, что позволяет существенно увеличить ток пучка (в два раза), скорость нарастания тока (до 5 раз) и мощность (в 1,5 раза). Это позволяет уменьшить низкоэнергетическую составляющую спектра пучка без применения специальных устройств и, следовательно, улучшить условия работы фольги для вывода пучка.
- Имеется возможность управлять эмиссионными свойствами МК-катода посредством изменения состава МК-пластины (размера металлических частиц, их плотности на поверхности и диэлектрической постоянной материала керамики).
- МК-катод может обеспечивать однородное распределение тока пучка электронов на выходе вакуумного диода, когда длительность импульса меньше времени перемыкания плазменного промежутка.
- МК-катод с экраном позволяет существенно увеличить импеданс вакуумного диода и формировать электронный пучок постоянного размера.
- Длительная эксплуатация, более 10⁸ импульсов, показала, что такой катод не изменяет своих характеристик, и они прекрасно воспроизводятся от импульса к импульсу и от образца к образцу одного и того же типа.
- Обладает относительной простотой конструкции.

В процессе исследования свойств МК-катода установлено, что в отличие от разряда вдоль поверхности диэлектрика в вакууме [3.13], для МК-катода напряжение U_{io}, соответствующее началу тока, увеличивается с ростом диэлектрической проницаемости и уменьшением относительной высоты МК-пластины.

Описанный комплекс свойств МК-катода, практически полностью лишенный недостатков МДМ-катодов, позволяет говорить о возможности широкого использования данного типа катодов в вакуумных диодах НУЭ различного типа.

Список литературы к главе 3

3.1 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. . Металлокерамический катод // Патент РФ № 2158982. БИ. 2000. №31. С. 403.

3.2 Котов Ю.А. Нанопорошки, получаемые с использованием импульсных методов нагрева мишени // Перспективные материалы. 2003. №4. С. 79-82

3.3 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5// ПТЭ. 2000. №1. С. 112-115.

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

3.5 Ауслендер В.А., Черток И.Л. Выпуск электронного пучка через фольгу // ПТЭ. 1998.
№6. С.99-103.

3.6 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

3.7 Смайт В.С. Электростатика и электродинамика. М.: Изд-во иностр. лит. 1954.

3.8 Татаринова Н.В., Новиков Н.Е., Соколов В.С. и др. Эрозионно-эмиссионные процессы, индуцированные плазмой в микропорах поверхности // Изв. РАН. Сер. физ., 1992. Т.56. №7. С.64-66

3.9 Татаринова Н.В. Повышение электрической прочности вакуумного промежутка с изолятором // ПТЭ. 1999. №5. С.74-78.

3.10 Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мелихова. М.: Энергоиздат, 1991. С. 235, 240.

3.11 Kotov Yu.A., Sokovnin S.Yu., Balezin M.E. Investigation of novel metal-ceramic cathode// Proc. of 12th Symposium on High Current Electronics, September 25-29, 2000. Tomsk, P.38-42.

3.12 Котов Ю.А., Е.А. Литвинов, Соковнин С.Ю. и др. Металлокерамические катоды для ускорителей электронов. ДАН. 2000. Т.370. №3. С.332-335.

3.13 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.

3.14 Котов Ю.А., А.В. Лучинский . Усиление мощности емкостного накопителя энергии прерывателем тока на электрически взрываемых проволочках //Физика и техника мощных импульсных систем // Под ред. Е.П. Велихова. М., 1986. С. 189-210.

3.15 Котов Ю.А., Филатов А.Л., Родионов Н.Е. и др. // Вакуумный изолятор с экранировкой поверхности диэлектрика // ПТЭ. 1986. № 2. С. 138-141.

3.16 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е., С.В. Барахвостов .Оптические Исследования металлокерамического катода// В межвуз. сб. науч. тр. "Проблемы спектроскопии и спектрометрии", Екатеринбург: УГТУ, 1999. Вып. 2. С. 109-112 (3.17)

3.17 Krasik Ya. E., Dunaevsky A., Krokhmal A. et. al. Emission properties of different cathodes at E<10⁵ V//cm // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89, P. 2379-2399.

3.18 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.

3.19 Месяц Г.А. Эктоны. Ч.1// Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. 184 С.

3.20 С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин // Улучшение эксплуатационных характеристик ускорителя УРТ-0,5 / ПТЭ, 2005, №3, с. 127-131.