

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ УСТАНОВКИ ЭМИТТЕРОВ И АНОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ДИОДА С МВК

М. А. Василевский, И. М. Ройфе, В. И. Энгелько, Е. Г. Янкин

Исследованы характеристики диода с различной плотностью работающих эмиттеров при емкости ГИНа в ударе 1 мкФ, диаметре МВК 21 см, в диапазоне начальных токов 150—550 А. Измерения производились при плотности установки эмиттеров из графитовых волокон 0.075—1.2 см⁻².

Применение МВК с большой плотностью работающих эмиттеров и соответственно малой скоростью генерации катодной плазмы позволило существенно замедлить изменение первеанса и изменение напряжения на диоде во времени. Оно также позволило экспериментально обнаружить влияние конструктивных особенностей и материала анода на длительность стадии работы диода до быстрого нарастания тока.

Использование анода с высокой геометрической прозрачностью позволило существенно увеличить длительность импульса тока и выявить зависимость длительности работы диода от плотности работающих эмиттеров. При плотности их установки 1.2 см⁻² получены электронные пучки с плотностью тока 2 А/см² и длительностью более 100 мкс при сравнительно небольшом изменении первеанса диода.

Выполненные к настоящему времени исследования диодов с многоострийными взрывоэмиссионными катодами (МВК) позволили существенно улучшить параметры генерируемых в них электронных пучков [1].

Вместе с тем еще не все закономерности работы диодов с МВК изучены достаточно полно. Одной из таких закономерностей является уменьшение длительности электронного пучка τ_n с ростом плотности тока в диоде [2].

В [3] был сделан вывод о целесообразности распределения тока МВК по возможно большему количеству эмиттеров при микросекундных длительностях импульса. Он был основан на результатах [4], где было показано, что при взрыве острия и длительности протекания тока $5\text{--}40 \cdot 10^{-9}$ с скорость генерации катодной плазмы зависит от величины тока острия.

В [5] было высказано предположение о зависимости коэффициента эрозии от полного тока диода с МВК, что позволило согласовать расчетные и экспериментальные данные о работе диода при длительности импульса до 10^{-4} с.

В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния на τ_n плотности установки эмиттеров D и соответственно величины тока через отдельный эмиттер I_0 , а также анодных процессов. Эксперименты проводились при емкости ГИНа, обеспечивающей снижение напряжения на диоде в течение импульса на величину не более 10—30 %.

Целью исследований являлся поиск путей увеличения τ_n при плотности тока j более 1 А/см².

Необходимо отметить, что уже известные результаты исследований диодов с МВК не позволяют сделать вывод о влиянии плотности работающих эмиттеров и соответственно величины тока через отдельный эмиттер на работу диода. Если не принимать специальных мер, то при высокой плотности установки эмиттеров (~ 1 см⁻²) работает лишь малая их часть. Распределение работающих эмиттеров по поверхности катода в этом случае неоднородно. Даже при одно-

родном взрыве эмиттеров, если не приняты специальные меры, величины токов через отдельные работающие эмиттеры неодинаковы.

Вместе с тем включение резисторов в цепь каждого из эмиттеров и использование для их изготовления пучков графитовых волокон позволяют получить однородное распределение токов через работающие эмиттеры и увеличить их количество [5, 6].

Таблица 1

Номер катода	Число эмиттеров	R_3 , Ом	a , см	D , см ²
I	19	50	4	0.075
II	85	220	2	0.29
III	331	1000	1	1.2
IV	181	1000	1×2	0.65

Исследование катода с различной плотностью работающих эмиттеров было проведено с конфигурацией электродов, описанной в [2], при емкости ГИНа в ударе 1.06 мкФ, в диапазоне начальных токов диода I_n 150—550 А. Применялись сплошные аноды из алюминия, меди, нержавеющей стали, сетчатый анод с прозрачностью 90 % из нержавеющей стали, а также аноды из большого числа тонкостенных трубок, изготовленных из нержавеющей стали и меди, закрепленных на алюминиевом или медном основании. Геометрическая прозрачность T такого трубчатого анода приближалась к 99 %.

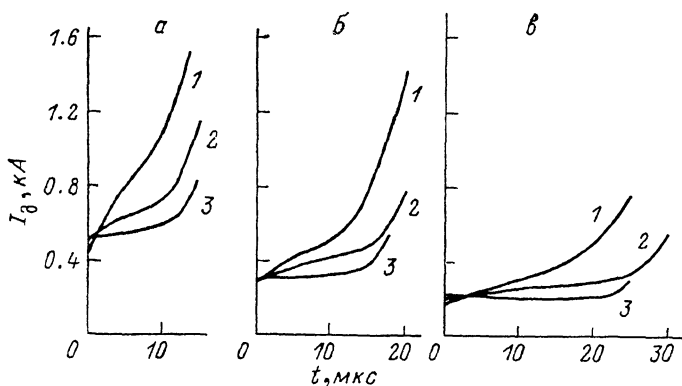


Рис. 1. Зависимость тока диода от времени.

a — 125, b — 90, c — 65 кВ. 1 — 19 эмиттеров. 2 — 85, 3 — 331.

Перед платой, на которой на расстоянии a друг от друга установлены эмиттеры с последовательно включенными резисторами, закреплена алюминиевая подложка, соединяемая с платой через резистор 6 кОм. При измерениях тока на подложку величина резистора уменьшилась до 1 Ом. Фокусирующий электрод (ФЭ) пирсовской геометрии устанавливался обычно в плоскости вершин эмиттеров и соединялся с платой через резистор величиной 2 кОм. Измерения проводились при четырех значениях плотности установки эмиттеров. Данные катодов приведены в табл. 1.

Величины резисторов, включенных последовательно с эмиттерами R_3 , в каждом варианте (кроме IV) изменялись таким образом, чтобы падение напряжения на них при равных значениях полного тока было приблизительно одинаковым. Для катодов с числом эмиттеров 19, 85, 331 расположение их по поверхности катода было равномерным. Катод IV был получен из катода III путем удаления части эмиттеров. Свободные ряды резисторов были экранированы медными кольцами, которые использовались как цилиндрические зонды, работающие в режиме тока насыщения, что позволяло оценить распределение концентрации плазмы по сечению катода на расстоянии 30 мм от вершин эмиттеров.

На рис. 1 приведены осциллограммы токов катода с различным количеством эмиттеров при трех значениях зарядных напряжений ГИНа (анод — сетчатый нержавеющий с геометрической прозрачностью 90 %). Начальные напряжения на диоде при этом приблизительно равны 65, 90, 125 кВ. Время между импульсами достигает 300 с. Фотографирование катода при различном времени его работы, задаваемом срезающим устройством, и измерение отношения токов отдельных острий и полного тока диода позволили определить число работающих эмиттеров для каждого из вариантов катода. В случае катодов I и II для всех напряжений и катодов III и IV для напряжения 125 кВ с начала импульса регистрируется включение более 90 % эмиттеров. Для катодов III и IV при напряжениях 65 и 90 кВ в начале импульса включается соответственно около 75 и 85 % эмиттеров; включение оставшихся невзорванными эмиттеров продолжается в течение всего времени до начала быстрого нарастания тока, что приводит к появлению различия между формами полного тока и токов через эмиттеры. Образование факелов на включающихся в течение импульса эмиттерах происходит не только на вершинах, но и на боковых поверхностях.

Уменьшение при снижении напряжения на диоде числа работающих с начала импульса эмиттеров ограничило минимальное значение тока через эмиттер в проведенных экспериментах величиной 0.7—0.8 А. Максимальное значение тока через эмиттер (катод I) в начале импульса более 25 А, в конце — более 36 А.

Отметим некоторые особенности работы диода в условиях данных экспериментов. На осциллограммах тока диода (рис. 1) можно выделить две стадии. В течение первых 10—20 мкс ток изменяется сравнительно медленно, затем скорость роста тока резко увеличивается и диод закорачивается. Напомним, что при меньшей емкости ГИНа, когда напряжение на диоде заметно уменьшается в течение импульса, ток диода плавно уменьшается со временем вместе с напряжением [1].

При работе диода с большим числом эмиттеров (катод III) наблюдается увеличение начального первеанса диода на 10—15 % при уменьшении начального тока диода с 500 до 200—180 А. Скорость изменения тока в начале импульса при величине тока через эмиттер около 1 А в значительной мере зависит от скважности — при увеличении интервала между импульсами или уменьшении его длительности срезающим разрядником скорость изменения тока в начале значительно уменьшается. Первеанс диода при этом даже уменьшается в течение некоторого промежутка времени после включения.

Анализ осциллограмм (рис. 1) показывает, что скорость нарастания тока и соответственно увеличение эмиссионной способности катодной плазмы в области эмиссии зависит от величины тока через эмиттер.

Скорость нарастания тока при одинаковых начальных токах существенно снижается при увеличении плотности установки эмиттеров. Вместе с тем время τ_n до стадии быстрого нарастания тока не увеличивается.

В [2] было установлено, что время τ_n соответствует времени, за которое концентрация плазмы нарастает до величины, необходимой для однородного токоотбора с эмиссионной границы. В то же время в центральной части катодной полости формируется область повышенной концентрации. Проведенные в описываемых экспериментах измерения тока на кольцевые зонды, установленные между рядами эмиттеров катода IV, подтверждают эти результаты.

В [2] отмечалось также, что резкому нарастанию тока диода предшествует появление тока с анода. Появление такой компоненты, высокоэнергичной и обладающей высокой ионизирующей способностью, может играть заметную роль в нежелательном повышении эмиссионной способности плазмы в области МВК [7, 9].

Для оценки влияния на τ_n анодных процессов были проведены эксперименты с анодами, изготовленными из различных материалов и имеющими различную прозрачность для электронного потока. Ионный ток с анода измерялся в цепи подложки. Провести эти измерения позволили следующие обстоятельства.

При большой плотности установки эмиттеров, а следовательно, и резисторов, включенных последовательно с ними, суммарная величина поверхности

резисторов в 3—4 раза превышает поверхность подложки. Катодная плазма эффективно рекомбинирует на поверхностях резисторов, вследствие чего величина тока из катодной плазмы на подложку, находящуюся под отрицательным относительно плазмы потенциалом для катодов III и IV, оказалась существенно меньше, чем в случае катода II.

Вероятность образования катодных пятен на подложке тоже уменьшилась. Это позволило провести измерения тока на подложку I_n для катодов III и IV при различных анодах.

Применение подложки из Al по сравнению с другими материалами позволяет увеличить составляющую тока в ее цепи, вызванную потоком ионов с анода, так как коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности Al в техническом вакууме (в диапазоне энергий 120—40 кэВ $\gamma_{ie}=10-5$) значи-

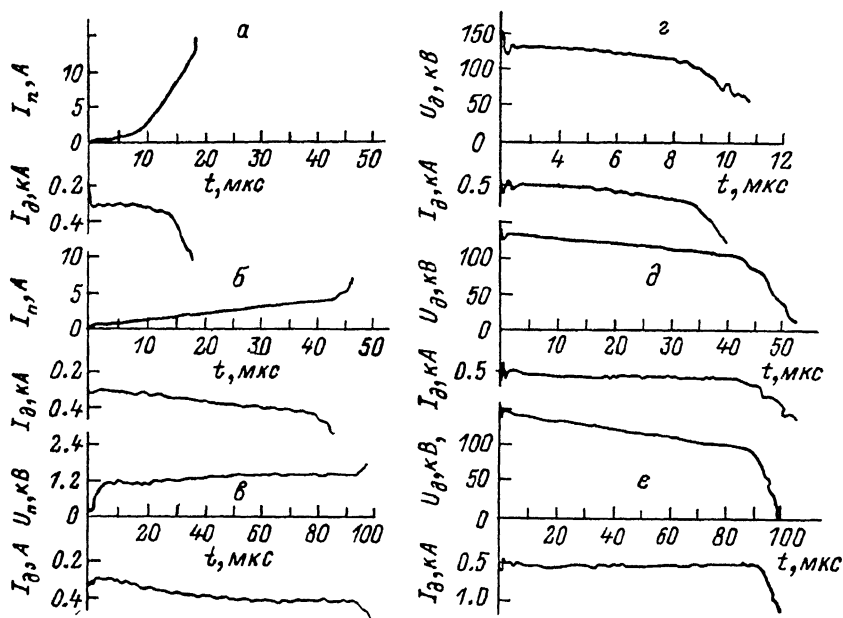


Рис. 2. Работа диода при различных анодах.

Начальный ток диода (А): а—с — 300, з—е — 500 А. а — нержавеющая сталь, $T=0.9$; б — нержавеющая сталь, $T=0.99$; в, д, е — медь, $T=0.99$; з — медь, сплошной анод. е — ФЭ выдвинут на 1 см. R_n : а, б — 1 Ом; в — 6 кОм.

тельно превышает эту величину для меди и стали — материалов, из которых изготовлены зонды [8].

На рис. 2 показаны осциллограммы токов диода и токов в цепи подложки при величине резистора $R_n=1$ Ом и различных анодах. Как видно, форма тока в цепи подложки существенно зависит от T . При недостаточной прозрачности анода монотонное изменение тока в цепи подложки переходит в стадию быстрого его увеличения. При этом, как отмечалось и в [2], наблюдается увеличение скорости нарастания полного тока диода, завершающееся переходом к пробою. Этот переход фиксируется в цепи подложки спустя 2—5 мкс после начала закорачивания диода. Величина тока в цепи подложки (например, в момент начала закорачивания диода) зависит от материала и прозрачности анода и тока диода. При изменении начального тока диода от 200 до 500 А максимум тока в цепи подложки изменялся от 10 до ≥ 30 А при сплошном нержавеющем аноде и от 3 до 22 А при нержавеющей сетке с $T=90\%$. При одинаковых анодах и токах диода величина тока в цепи подложки увеличивается приблизительно в 2 раза при увеличении напряжения на 15 % и увеличении плотности тока на аноде. При увеличении напряжения в 1.5 раза, но некотором снижении плотности тока на аноде эта величина возрастает в 1.5 раза. Длительность импульса в этих случаях изменялась, но незначительно.

Изменение материала анода и дальнейшее увеличение степени его прозрач-

ности привели к существенному уменьшению скорости увеличения тока в цепи подложки.

На рис. 3, а приведены зависимости этой величины, измеренной перед началом закорачивания диода, от начального тока диода (и напряжения) для анодов, используемых в экспериментах. Изменение скорости нарастания тока для анодов из разных материалов находится в соответствии с величиной $\sqrt{c\lambda\rho}$ (c, λ, ρ — удельные теплоемкость, теплопроводность и плотность), определяющей временную зависимость температуры поверхности анода.

При высокой прозрачности анода скорость роста тока уменьшается более чем на порядок. Изменяется и степень ее зависимости от тока пучка (вместо кубической зависимости становится квадратичной). Скорость нарастания тока в цепи подложки при трубчатом аноде, как показали измерения, не изменяется при изменении напряжения и плотности анодного тока. Она не зависит от материала анода.

Эксперименты показали также, что длительность импульса тока диода зависит как от материала анода, так и в очень большой степени от прозрачности анода (рис. 3, б). При использовании трубчатого медного анода, имеющего геометрическую прозрачность 99% и развитую поглощающую поверхность, длительность импульса при начальном токе 300 А достигает 100 мкс (рис. 2).

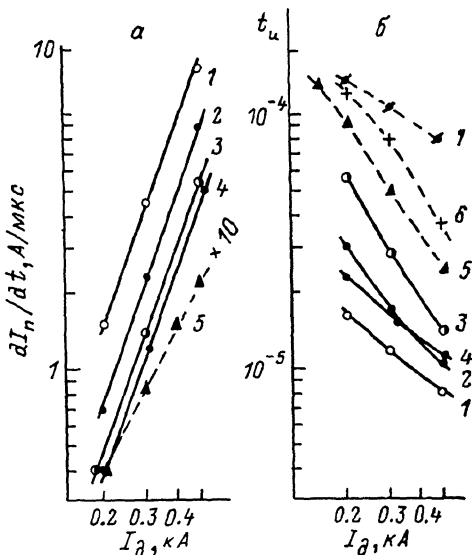


Рис. 3. Зависимости от начальных токов диода скорости изменения тока в цепи подложки к моменту пробоя диода (для анода с $T=0.99$ увеличена в 10 раз) (а) и длительности импульса электронного пучка (б).

Материалы и конструкции анода: 1 — нержавеющая сталь, сплошной; 2 — алюминий, сплошной; 3 — медь, сплошной; 4 — нержавеющая сталь, $T=0.9$; 5 — нержавеющая сталь, $T=0.99$; 6 — медь, $T=0.99$; 7 — медь, $T=0.99$, ФЭ выдвинут на 1 см.

При токе 150 А она практически определяется временем разряда ГИНа. При увеличении межэлектродного зазора и увеличении в соответствии с законом «3/2» напряжения на диоде длительность импульса при одинаковых начальных токах увеличивается незначительно, как и в случае сплошных анодов.

Как видно из рис. 2, спад напряжения на диоде при токе 500 А ($j_p=1.5$ А/см²) и длительности импульса 50 мкс в этом случае не превосходит 20% при начальном напряжении 125 кВ. В отличие от анодов с малой прозрачностью при использовании трубчатого анода наблюдается увеличение длительности импульса тока пучка при выдвигании ФЭ (рис. 2; 3, б). При выдвигании ФЭ на 1 см длительность импульса при начальном токе 500 А достигла ~100 мкс. Начальное напряжение на диоде для получения тока, равного току при обычном положении ФЭ, необходимо было увеличить с 125 до 145 кВ. Необходимо отметить, что длительность импульса возрастала и при выдвигании вершин острий из плоскости ФЭ, однако скорость снижения напряжения на диоде при используемой емкости ГИНа в ударе (1.06 мкФ) существенно увеличилась вследствие увеличения начального перваанса диода из-за уменьшения межэлектродного расстояния и расфокусировки пучка.

Для оценки вклада ионной компоненты из приэлектродной плазмы и из анодной области в регистрируемый в цепи подложки ток обрабатывалась вольт-амперная характеристика (ВАХ) цепи подложка—эмиттеры, получаемая после быстрого закорачивания диода с применением срезающего разрядника. Время среза тока диода не превосходило 0.2 мкс (рис. 4). На подложку, помимо смещения вследствие падения напряжения на резисторах, включенных последовательно с эмиттерами (−0.8 мВ при токе диода 200 А), подавалось дополнительное смещение −0.3–0.6 кВ. Это позволило определить ионный и электрон-

ный ток насыщения из плазмы после выключения тока пучка в различные моменты времени при различных анодах из нержавеющей стали — трубчатом и сетчатом. На рис. 4 показаны осциллограммы ионного и электронного токов

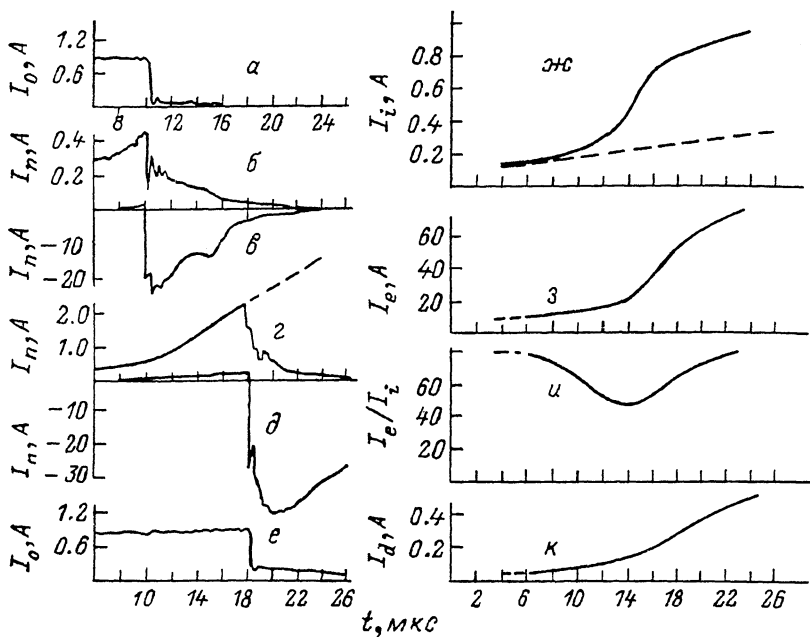


Рис. 4. Изменение токов в цепи подложки при срезе напряжения на диоде. Анод — нержавеющая сетка, $T=0.9$.

a, e — ток одного из эмиттеров при величине смещения $U_{II}=+300$ В; *б, з* — I_n при $U_{II}=-50$ В; *в, д* — I_n при $U_{II}=+300$ В; *жс* — ионный ток насыщения через 1 мкс после среза (штриховая кривая — то же при аноде с $T=0.99$); *з* — электронный ток насыщения через 2 мкс после среза; *и* — отношение I_e/I_i ; *к* — ионный ток с анода в предположении $\gamma_{ie}=5$.

насыщения. Видно, что в начале импульса, до быстрого нарастания тока в цепи подложки, после среза при отрицательных смещениях уровень тока в цепи подложки резко падает, затем наблюдается медленное его затухание (рис. 4, б). В случае дополнительного положительного смещения измеряется электронный ток из плазмы. При большем времени среза сигнал до нового уровня менее резкий, сигнал после среза затухает значительно быстрее (рис. 4, з).

Зависимости ионного и электронного токов насыщения, полученных после обработки ВАХ, а также их отношения от времени среза приведены на рис. 4. Видно, что эмиссионная способность плазмы вблизи поверхности подложки возрастает к концу импульса почти на порядок. Отношение I_e/I_i , равное для катодной плазмы, снижается, а затем вновь увеличивается, что свидетельствует об изменении параметров катодной плазмы. Если предположить, что после начала нарастания тока в цепи подложки разность токов до и после среза есть вторично-эмиссионный электрон

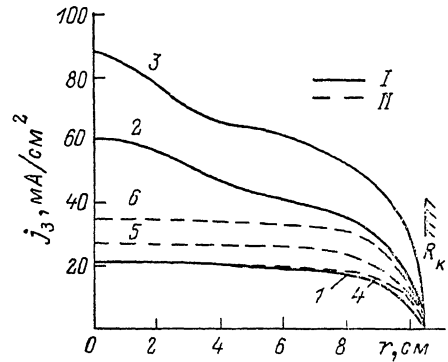


Рис. 5. Распределение плотности тока на кольцевые зонды при использовании анодов из нержавеющей стали с $T=0.9$ (*I*) и 0.99 (*II*).

Начальные токи диода (А): 1, 4 — 200; 2, 5 — 300; 3, 6 — 500. Время измерения (мкс) тока диода (А) в момент измерения: 1 — 22, 260; 2 — 14, 500; 3 — 10, 200; 4 — 50, 300; 5 — 25, 400; 6 — 12, 500.

тронный ток из Al, вызванный ионным потоком из анодной области ($\gamma_{ie} \approx 5$ [8]), можно получить зависимость от времени ионного тока с анода (рис. 4).

Как отмечалось, при срезе тока диода в начале импульса ток в цепи подложки резко спадает до нового уровня. Аналогичный вид имеют осцилло

граммы при трубчатом аноде и при больших временах среза. Величина ионного тока насыщения для этого случая также показана на рис. 4. Видно, что не наблюдается резкого нарастания I_i после 10 мкс, характерного для анода с низкой прозрачностью. Отметим еще, что временные зависимости ионного потока и тока в цепи подложки приблизительно одинаковы. В диапазоне начальных токов 200—500 А величина ионного тока из области анода к концу импульса может достигать 0.5—2.0 А ($j=1.7-7.0$ мА/см²).

Как показывают измерения с использованием катода IV и кольцевых зондов, измеряющих ионный ток из плазмы, зависимость от времени пространственного распределения эмиссионной способности плазмы изменяется при изменении прозрачности анода. Схема измерений и методика обработки результатов были аналогичны [2]. Как и в [2], при использовании сетчатого анода и сплошного анода из Al зонды регистрируют нарастание сигнала в течение всего импульса. Измерения показывают, что первоначально равномерное распределение $n\sqrt{T_e}$ изменяется таким образом, что в центральной части катодной полости формируется область с повышенной эмиссионной способностью. Этот эффект наблюдается и на значительном расстоянии от вершин эмиттеров. На рис. 5 показаны распределения по радиусу плотности тока на кольцевые зонды, приблизительно соответствующей плотности ионного тока насыщения из плазмы в окрестности зондов. Распределения для сетчатого анода из нержавеющей стали приведены для моментов времени, соответствующих максимальной длительности импульса (рис. 3, б). При использовании трубчатого анода нарастание сигнала зондов наблюдается в течение времени, соответствующего, по-видимому, времени расширения плазмы в области вершин эмиттеров.

Таблица 2

l, см	P/P ₀	
	изм.	расч.
-1	0.65	—
0	1.0	1.0
0.5	1.3	1.12
1	1.55	1.27
2	2.25	1.65

Таблица 3

Анод	Номер катода	P _{кон} /P _{нач}		
		I _н , А		
		200	300	500
Сетка из нержавеющей стали, T=0.9	II	1.86	1.76	1.66
	III	1.32	1.37	1.37
Медные трубки, T=0.99	II	7.0	3.4	2.0
	III	5.5	3.0	1.7

Для тока диода ~300 А это время равно ~15÷20 мкс. В дальнейшем рост тока на зонды прекращается. Распределение плотности тока на зонды при этом остается равномерным. На рис. 5 оно приведено для моментов времени, превышающих время закорачивания диода при использовании анодов с низкой прозрачностью.

Проведенные измерения позволяют оценить вклад, который вносит в зондовые измерения ионный ток из анодной области. С учетом того что фронтальная поверхность кольцевого зонда в π раз, а сферических, использованных в [2], в 4 раза меньше их полных поверхностей, эта величина не превосходит 10 % для случая равномерного ионного потока с анода. Вместе с тем распределение плотности тока на зонды по сечению отражает, по-видимому, факт неравномерного распределения плотности ионного потока.

Применение трубчатого анода позволяет существенно увеличить длительности импульса тока, однако переход к стадии быстрого закорачивания диода наблюдается и в этом случае при малом по сравнению с межэлектродным зазором перемещением эмиссионной границы. Использование зависимости начального (определенного через 1—2 мкс после начала работы диода) первеанса

от положения плоскости вершин эмиттеров относительно плоскости ФЭ позволяет аналогично [10] определить величину расстояния от эмиссионной границы до вершин эмиттеров в различные моменты времени после включения диода. Предполагается, что ток диода определяется законом «3/2». Эта величина может быть несколько завышена, так как не учитывается увеличение диаметра катода при расширении плазмы в радиальном направлении.

Величины начального первеанса диода при смещении l плоскости вершин эмиттеров относительно плоскости ФЭ показаны в табл. 2. Первеанс диода при нулевом смещении принят равным 1. Здесь же приведены расчетные величины отношения первеансов для плоского диода. Измерения проведены с использованием катода III. Как видно из табл. 2, изменение первеанса при выдвигании эмиттеров превосходит расчетное, соответствующее закону «3/2» для плоского диода. Это обусловлено, вероятно, изменением геометрии электронного потока. Измерения плотности тока на аноде показывают [10], что при отрицательных смещениях пучок сжат, при положительных расширен.

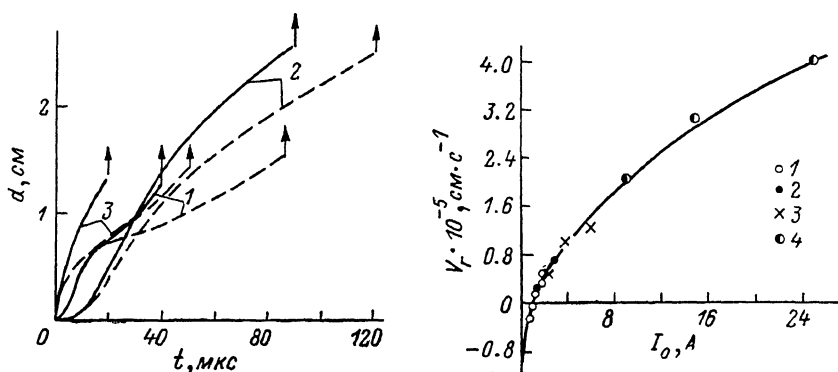


Рис. 6. Зависимость перемещения эмиссионной границы от времени.

1 — катод III (331 эмиттер), I_0 500 А; 2 — катод III, I_0 300 А; 3 — катод II (85 эмиттер), I_0 500 А. Сплошные линии — ФЭ находится в плоскости вершин эмиттеров, штриховые — ФЭ выдвинут на 1 см.

Рис. 7. Зависимость начальной скорости движения эмиссионной границы от тока эмиттера.

Количество эмиттеров: 1 — 331, 2 — 181, 3 — 85, 4 — 19.

В табл. 3 приведены величины отношений измеренных в конце и начале импульсов первеансов диода для катодов II и III (с 85 и 331 эмиттерами) при разных начальных токах.

Как следует из [11], при измеренном в конце импульсов уровне ионного потока с анода первеанс диода, ток в котором определяется законом «3/2», увеличивается не более чем на 10%. Таким образом, к концу импульса эмиссионная граница для катодов II и III и анода с малой прозрачностью находится на расстоянии 1.0—1.2 и 0.4—0.6 см от вершин эмиттеров, что не превышает половины расстояния между ними.

Если используется трубчатый анод, эмиссионная граница перемещается внутрь ускорительного промежутка существенно глубже, причем ее положение к моменту пробоя зависит от тока диода. На рис. 6 показана расчетная зависимость положения эмиссионной границы от времени для двух положений вершин эмиттеров относительно плоскости ФЭ для начальных токов катода III 300 и 500 А (катода II 500 А) и одинаковых расстояний между вершинами эмиттеров и анодом. Как видно из рис. 3, б и 6, выдвигание ФЭ на 1 см при использовании трубчатого анода существенно увеличивает длительность электронного пучка, генерируемого с использованием катода III. Аналогичный результат получается и при установке катода II. Из рис. 6 видно, что увеличение длительности достигается замедлением скорости перемещения эмиссионной границы в начальной части импульса. Закорачивание диода, характеризующееся, как и в случае анода с малой прозрачностью (рис. 1), увеличением скорости нарастания тока, начинается при перемещении эмиссионной границы на расстояние около 1.5, 2.5, 3.75 см при начальных токах 500, 300 и 200 А

соответственно. Как следует из рис. 6, это расстояние слабо зависит от плотности установок эмиттеров и положения ФЭ. Приблизительно на то же расстояние перемещается граница эмиссии к моменту начала закорачивания и при увеличенном межэлектродном зазоре. Из рис. 6 также видно, что при трубчатом аноде длительность работы диода существенно зависит от плотности установки эмиттеров.

Используя результаты измерений, часть которых представлена на рис. 1, 6 и в табл. 2, можно получить зависимость скорости перемещения эмиссионной границы V_r в начале импульса от тока одного эмиттера I_0 для катодов с различной плотностью установок эмиттеров (рис. 7), которая хорошо аппроксимируется следующим выражением:

$$V_r \approx 10^5 (\sqrt{I_0 [A]} - 1) \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Подчеркнем, что зависимость $V_r(I_0)$ получена при формальном использовании закона «3/2» и измеренных начальных первеансах диода при разных положениях вершин эмиттера относительно ФЭ.

Таблица 4

Номер катода	Смещение ФЭ, см	V_r , см/с	I_0 , А	I_b , А
III	0	$2.5 \cdot 10^4$	320—560	1.0—1.7
III	1	$1.7 \cdot 10^4$	300—500	1.0—1.6
II	0	$6 \cdot 10^4$	500—700	6.0—8.4
II	1	$3 \cdot 10^4$	400—600	5.0—7.2

Как указывалось, при малых токах эмиттеров величина скорости зависит от времени между импульсами. Это позволяет предположить, что на механизм генерации катодной плазмы в начале работы катода оказывают влияние пленки, образовавшиеся на поверхности эмиттеров в промежутке между импульсами.

Из измерений (часть из них приведена на рис. 6) следует, что при больших длительностях работы катода наблюдается замедление скорости перемещения границы эмиссии. Данные о скорости движения эмиссионной границы в конце импульса приведены в табл. 4.

Изменение скорости в 2 раза при изменении тока эмиттера от 1—1.7 А (катод III) до 6—8.4 А (катод II) позволяет предполагать, что ее зависимость от тока эмиттера наблюдается и при больших длительностях импульса.

Выводы

1. При плотности энергии пучка, выделенной на аноде, > 1 Дж/см² длительность работы диода с МВК зависит от теплофизических характеристик материала анода и его прозрачности. Ограничение длительности связано с влиянием ионного тока с анода на характеристики катодной плазмы.
2. Скорость изменения первеанса диода и соответственно скорость движения эмиссионной границы катодной плазмы уменьшаются при уменьшении тока через один эмиттер.
3. Длительность работы диода с МВК при применении анодов с высокой прозрачностью существенно зависит от положения эмиттеров относительно фокусирующего электрода.
4. В экспериментах получены электронные пучки с плотностью тока около 2 А/см² и длительностью $\sim 10^{-4}$ с при начальном напряжении на диоде до 150 кВ. Снижение напряжения во время импульса не превосходило 35 %.

Литература

- [1] Бурцев В. А., Василевский М. А., Гусев О. А. и др. В кн.: Докл. Всес. конф. по ИПТР. Л., НИИЭФА, 1977, т. 2, с. 120.
- [2] Василевский М. А., Ройфе И. М., Энгелько В. И., Янкин Е. Г. ЖТФ, 1986, т. 56, № 3, с. 469—475.

- [3] *Абдуллин Э. Н., Баженов Г. П., Чесноков С. М.* Тез. докл. Всес. симпозиума по некалиевым катодам. Томск, ИФА СО АН СССР, 1977, с. 15—16.
- [4] *Баженов Г. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А.* ЖТФ, 1973, т. 43, № 6, с. 1255—1269.
- [5] *Василевский М. А., Ройфе И. М., Энгелько В. И.* ЖТФ, 1981, т. 51, № 6, с. 1183—1194.
- [6] *Бурцев В. А., Василевский М. А., Ройфе И. М.* и др. Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 18, с. 1083—1087.
- [7] *Баженов Г. П., Ладыженский О. Б., Ратахин Н. А.* В кн.: Тез. докл. VI Всес. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, ТФ СО АН СССР, 1986, ч. 1, с. 88—90.
- [8] Таблицы физических величин. Справочник под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [9] *Крейндель Ю. Е.* Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
- [10] *Василевская Ю. А., Василевский М. А., Ройфе И. М.* и др. ЖТФ, 1983, т. 53, № 4, с. 677—682.
- [11] *Иви Ф.* Проблемы современной физики, 1956, № 6, с. 5—103.

Поступило в Редакцию
20 января 1987 г.