

УДК 537.533.3

МНОГООСТРИЙНЫЙ ВЗРЫВНОЙ КАТОД С ИНДУКТИВНОЙ СВЯЗЬЮ

Б. А. Азимджанов, Т. У. Арсланбеков, Ю. Н. Митин, В. Е. Чекалин

Предложено описание работы взрывного катода с индуктивной положительной связью. Рассмотрены характеристики работы двух индуктивно связанных многоостриевых катодов в сравнении с режимом работы этих же катодов в отсутствие индуктивной связи. Индуктивно-связанные катоды отличаются высокой пространственно-временной однородностью тока электронов.

При использовании диода с многоостриевым взрывным катодом возникает проблема эффективного равномерного использования всех острий. Известны сильноточные взрывные катоды, в которых эмиссия электронов идет из плазмы катодного материала, испаряющегося при взрыве острий эмиттеров. При работе взрывных катодов на общем основании током происходит лишь с 20 % острий. Чтобы использовать эти резервы многоостриевых взрывных катодов, в работах [1, 2] была предложена схема, по которой каждое острие соединено с общим основанием через активное сопротивление.

В данной работе описывается взрывной катод с двумя остриями с индуктивной связью, схематически изображенной на рис. 1. Положительным моментом использования индуктивностей является малая рассеиваемая ими энергия: энергия не выделяется в виде джоулева тепла, как в активных сопротивлениях, а запасается в магнитном поле. Дальнейшим шагом усовершенствования данной конструкции будет использование энергии магнитного поля индуктивностей. С этой целью между индуктивностями отдельных острий катода организуется положительная магнитная связь, чтобы при взрыве одного из острий на остальных вследствие взаимной индукции возникло бы дополнительное напряжение. В этом случае увеличение напряжения приведет к увеличению автоэмиссионного тока с невзорвавшихся микроострий. Проследим основные закономерности работы многоостриевых катодов с положительной индуктивной связью. Каждое из двух острий соединяется с электродом отрицательного потенциала генератора через катушки индуктивности L_1 , L_2 , имеющие общую магнитную связь, характеризующуюся коэффициентом взаимной индукции L^* .

Выпишем уравнения для токов в цепи

$$L \frac{dI_1}{dt} + L^* \frac{dI_2}{dt} + U_1 = U, \quad L \frac{dI_2}{dt} + L^* \frac{dI_1}{dt} + U_2 = U, \quad (1)$$

где I_1 , I_2 — токи с первого и со второго острий; U_1 , U_2 — падение напряжения на остриях; U — напряжение генератора.

Используя уравнение (1), мы предполагаем бесконечную емкость генератора, что не должно сильно отличаться от реальной ситуации, так как до момента взрыва микроострий катода используется малая доля запасенной в генераторе энергии. Токи с острий катода функционально связаны с падением напряжения на этих остриях. В режиме автоэмиссионного тока — это функция Фаулера — Нордгейма [3]

$$I = AU^2 \exp \{-B/U\}, \quad (2)$$

где I — ток; U — напряжение на диоде; A, B — параметры, зависящие от материала катода и геометрии всего диода.

После взрыва микроострия ток подчиняется закону «3/2» [4]

$$I = PU^{3/2}, \quad (3)$$

где P — параметр диода.

Уравнение (1) можно решить, задав начальные условия. Предположим, что ток с микроострий (автоэмиссионный ток) на начальном этапе был постоянным: $I_1, I_2 = \text{const}$. Это значит, что начальные условия для уравнения (1) можно записать в виде

$$U_1(t=0) = U_2(t=0) = U.$$

В момент времени $t=0$ происходит взрыв одного из острий. За время τ функциональная зависимость $I_1 = I_1(U_1)$ переходит от формулы (2) к (3). Аппроксимируем этот переходный процесс

$$U_1 = Ue^{-t/\tau} + (I_1/P)^{2/3}(1 - e^{-t/\tau}), \quad (4)$$

где τ — релаксационное время.

Задача состоит в том, чтобы найти ток I_2 . Но поскольку ток I_2 функционально связан с U_2 , то достаточно найти падение напряжения U_2

$$U_2 = \left(1 - \frac{L^*}{L}\right)U + \frac{L^*}{L}U_1 - \left[1 - \left(\frac{L^*}{L}\right)^2\right]L \frac{dI_2}{dt}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что в случае отрицательного L^* разность потенциалов U_2 увеличивается, тем самым увеличивается ток I_2 . Таким образом, увеличение тока I_1 приводит к возрастанию тока I_2 . Как следует из (5), за время $t \sim \tau$ ток в цепи увеличится на значительную величину, поэтому при $t \leq \tau$ последним слагаемым в (5) можно пренебречь. Максимальное изменение потенциалов не может превышать величину τ^{-1} , следовательно, $|dU_2/dt| \leq U_2/\tau$. Приведенные рассуждения позволяют найти приближенное решение уравнения (5) методом итераций

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{dI_2}{dU_2} \frac{dU_2}{dt}. \quad (6)$$

Теперь, отбрасывая в (5) последнее слагаемое, подставляя полученное выражение в (6), с учетом (4) получаем

$$\frac{dI_2}{dt} = -\frac{L^*}{L} \frac{U}{\tau} \frac{dI_2}{dU_2} e^{-t/\tau}. \quad (7)$$

После любого числа итераций уравнения (5) решение его можно записать в виде

$$U_2 = \left(1 - \frac{L^*}{L}\right)U + f(U_2, t)e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

где $f(U_2, t)$ — некоторая конечная функция. В интервале времен $\tau \ll t \ll \theta = \frac{3}{2}PL\sqrt{U}$ функция $U_2(t)$ принимает значение

$$U_2 = (1 - L^*/L)U.$$

Если взаимная индукция между катушками такова, что $L^* = -L$, то фактически происходит удвоение потенциала на втором (невозвратившемся) острие. Нетрудно показать, что увеличение потенциала должно происходить и в случае большего числа острий, индуктивно связанных друг с другом. Действительно,

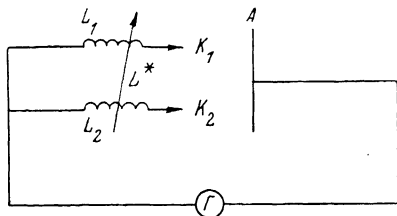


Рис. 1. Схема многоострийного взрывного катода с двумя остриями с индуктивной связью.

L_1, L_2 — катушки индуктивности; L^* — взаимная индуктивность катушек; K_1, K_2 — острия катода; A — анод; Γ — высоковольтный генератор (ГИН).

при взрыве второго острья катода на третьем острие (невзорвавшееся) дополнительно подается напряжение

$$U_3 = (1 - 2L^*/L)U.$$

Следовательно, нетрудно сделать общий вывод: если на n остриях образовалась плазма, то на остриях, работающих в автоэмиссионном режиме, возникает дополнительное падение напряжения

$$U_k = \left(1 - n \frac{L^*}{L}\right)U,$$

т. е. процесс образования плазмы на индуктивно связанных остриях взрывного катода носит лавинообразный характер. Естественно, что напряжение U_k не может расти бесконечно. Ограничение величины U_k можно найти из нарушения условия малости падения напряжения, определяемого выражением (4) при

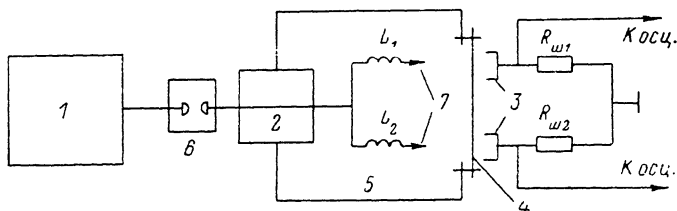


Рис. 2. Схема измерений.

$t \geq \tau$. Из этого условия получаем $U_k \leq U_{\max}$, где U_{\max} определяется из выражения

$$AU_{\max}^2 \exp\{-B/U_{\max}\} = PU^{3/2}.$$

Для оценки работы многоострийного взрывного катода с индуктивной связью была предложена схема (рис. 2). Генератор импульсных напряжений (ГИН) 1 вырабатывал импульсы напряжения амплитудой 250 кВ, длительностью 250 нс. Максимальная запасаемая энергия генератора достигала 2 кДж. Генератор был собран по схеме Аркадьева—Маркса. Далее импульсы напряжения поступал на обостряющий разрядник 6 высокого давления. После срабатывания разрядника, пройдя изолятор 2, высоковольтный импульс поступал в нагрузку — вакуумный диод 5, содержащий катоды 7 и общий анод 4. Анодом служила тонкая Al фольга толщиной 50 мкм. Катоды 7, выполненные в виде отдельных острий, имели возможность независимой регулировки междуэлектродного зазора катод—анод. Электронные токи с каждого из катодов в области за фольгой измерялись двумя цилиндрами Фарадея 3, нагруженными на низкоомные малоиндуктивные шунты $R_{ш1} = R_{ш2} = 0.8$ Ом. Сигналы с емкостного делителя напряжения, не указанного на рис. 2, а также с цилиндров Фарадея поступали на входы осциллографа 6ЛРО4, где происходила их фоторегистрация.

Исследовались два режима подключения взрывных катодов: 1) непосредственно к токопроводу ГИН, 2) через взаимно связанные индуктивности L_1, L_2 . Индуктивности были выполнены таким образом, что $L_1 = L_2 = 10$ мкГн. Переход от случая безындуктивного режима работы к случаю, когда индуктивности были включены и наоборот, происходил путем установки токопроводящей перемычки или ее удаления. Иначе говоря, геометрия катода и его токонесящего основания в обоих случаях оставалась неизменной.

В устройстве катодного узла имелась возможность изменения расстояния между остриями и анодом. Интерес представляли не сами междуэлектродные расстояния d_{AK_1} и d_{AK_2} , а их относительная разность $d_{AK_1} - d_{AK_2}$. Величина $d_{AK_1} - d_{AK_2}$ изменялась от 0 до 8 мм.

На рис. 3 представлены осциллограммы импульсов напряжения и тока.

На рис. 4 представлены зависимости $(I_1 - I_2)/I_1$ от $d_{AK_1} - d_{AK_2}$, где I_1, I_2 — максимальные значения токов электронов для каждого из катодов. Сплошной линией обозначен режим работы катодов в отсутствие индуктивной связи, а штриховой при ее включении. Видно, что наличие индуктивной связи между като-

дами стабилизирует электронные токи с катодов, даже при разности их междуэлектродных расстояний, достигающей 8 мм. Для этого случая значения токов I_1 и I_2 отличались друг от друга не более чем на 10%. В то же время отсутствие положительной индуктивной связи приводило к очень большому разбросу значений I_1 и I_2 . Это говорит о явно нестабильной работе взрывных катодов. Режим работы катодов без индуктивной связи характеризуется гораздо большими амплитудными значениями электронных токов. При таком режиме трудно получить высокую пространственную однородность полного тока электронов за фольгой. В соответствии с теорией работы индуктивно связанных катодов можно сказать, что увеличение эмиссионного тока с одного из острий приводит к увеличению тока электронов с другого острия. Об этом факте говорит практическое равенство токов I_1 и I_2 при большом разбросе их междуэлектродных зазоров $d_{AK_1} - d_{AK_2}$.

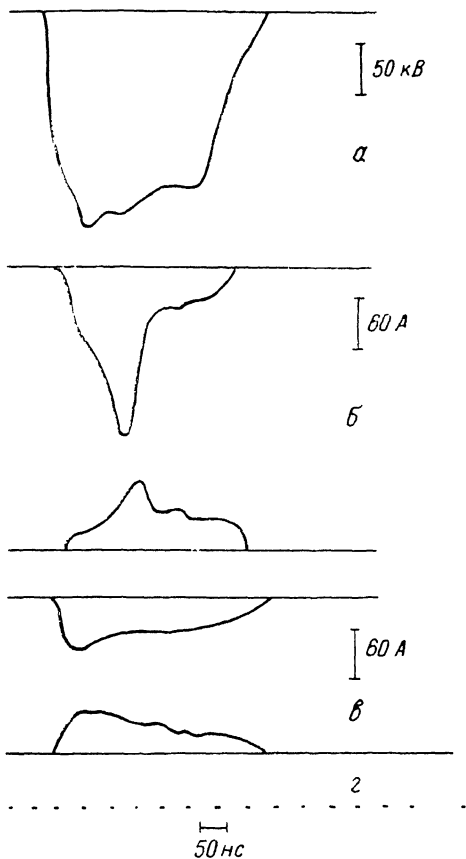
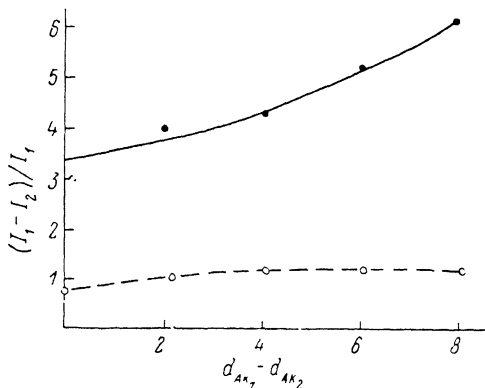


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения, сформированного ГИИом (а), электронных токов, зарегистрированных цилиндрами Фарадея в отсутствие (б) и при наличии (в) индуктивной связи между катодами. Метки времени, интервал 50 нс (а).

Рис. 4. Зависимость $(I_1 - I_2)/I_1$ от $d_{AK_1} - d_{AK_2}$.



Из-за отсутствия индуктивной связи только на одном из катодов наблюдается скачок электронного тока, что приводит к сильной неоднородности общего электронного потока. Следует также отметить высокую временную однородность электронных токов для случая индуктивно связанных катодов.

Таким образом, возможно применение индуктивно связанных катодов для получения электронных пучков большого сечения с целью улучшения их пространственно-временной однородности. Индуктивно связанные катоды могут работать в широком диапазоне длительностей и плотностей электронных токов.

В заключение авторы выражают благодарность Б. А. Зону за обсуждение и внимание к работе.

Литература

- [1] Бурцев В. А. и др. Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 19, с. 1149—1152.
- [2] Василевская Ю. А. и др. ЖТФ, 1983, т. 53, № 4, с. 677.
- [3] Елинсон М. И. Некаликвальные катоды. М.: Сов. радио, 1974, с. 167.
- [4] Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.

Отдел теплофизики АН УзССР
Ташкент

Поступило в Редакцию
24 февраля 1987 г.

В окончательной редакции
19 ноября 1987 г.