



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. С. Камруков, Н. П. Козлов, Ю. С. Протасов, О радиальном ограничении зоны фокуса магнитоплазменного компрессора, *ТВТ*, 1978, том 16, выпуск 2, 268–273

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.239.153.44

6 ноября 2024 г., 08:06:42



УДК 537.523

О РАДИАЛЬНОМ ОГРАНИЧЕНИИ ЗОНЫ ФОКУСА МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО КОМПРЕССОРА

Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С.

Исследовано влияние радиального ограничения зоны плотного плазменного фокуса на динамические, энергетические и спектральные характеристики сильноточного плазмодинамического разряда. Показано, что магнитное поджатие потока и значительная осевая составляющая скорости позволяют достигать высоких температур плазмы без опасности разрушения, ограничивающих разряд стенок, что позволяет использовать радиально ограниченный разряд в качестве высокоинтенсивного источника излучения в видимой и ближней УФ-областях спектра с временами нарастания светового импульса ~ 1 нс.

В работах [1, 2] было показано, что при определенных условиях за срезом импульсного эрозионного ускорителя плазмы, работающего в вакууме $\sim 10^{-5}$ мм рт.ст., за счет процессов, происходящих в межэлектродном зазоре и в выносных токах, формируется сжатая зона с характерными значениями электронной температуры и концентрации $\sim 3-5$ эВ и $5 \cdot 10^{17}-3 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ соответственно. Плазма с такими параметрами может быть использована в качестве высокоинтенсивного источника излучения [3].

Однако при решении различных задач, связанных с воздействием светового излучения на вещество (импульсная фотохимия, оптическая накачка ОКГ и др.), существенной становится изоляция облучаемого вещества от плазмы источника света. Это обстоятельство в значительной степени ограничивает применение известных высокоинтенсивных источников света открытого типа (ударные волны, электрический взрыв проволок и фольг, *H*-прижатый разряд и т. д.). Импульсные газоразрядные лампы имеют малую яркость излучения в номинальном режиме, особенно в УФ-области спектра; увеличение мощности излучения и крутизны передних фронтов импульсов света за счет форсирования энергетического режима приводит к резкому ухудшению эксплуатационных характеристик ламп [4].

В связи с этим представляет интерес исследование возможности локализации плазменного фокуса прозрачными стенками и изучение влияния радиального ограничения на динамические и радиационные свойства разряда.

Источником плазмы служил магнитоплазменный компрессор (МПК) эрозионного типа с диаметром выходных цилиндрических электродов: анода — 50 мм и катода (центральный электрод в первый полупериод тока) — 16 мм и длиной зоны ускорения $\sim 5-10$ мм. Материал электродов — медь. В качестве плазмообразующих веществ использовались фторопласт-4 (C_2F_4) $_n$ и CsI. Радиальное ограничение разряда осуществлялось кварцевыми трубами (марки КВ) длиной 200 мм и внутренним диаметром 100, 60 и 25 мм (толщина стенки ~ 5 мм).

Накопителем электрической энергии служила батарея малоиндуктивных параллельно соединенных конденсаторов типа ИММ-5-150 общей ем-

Вклейка к статье Камрукова А. С и др.

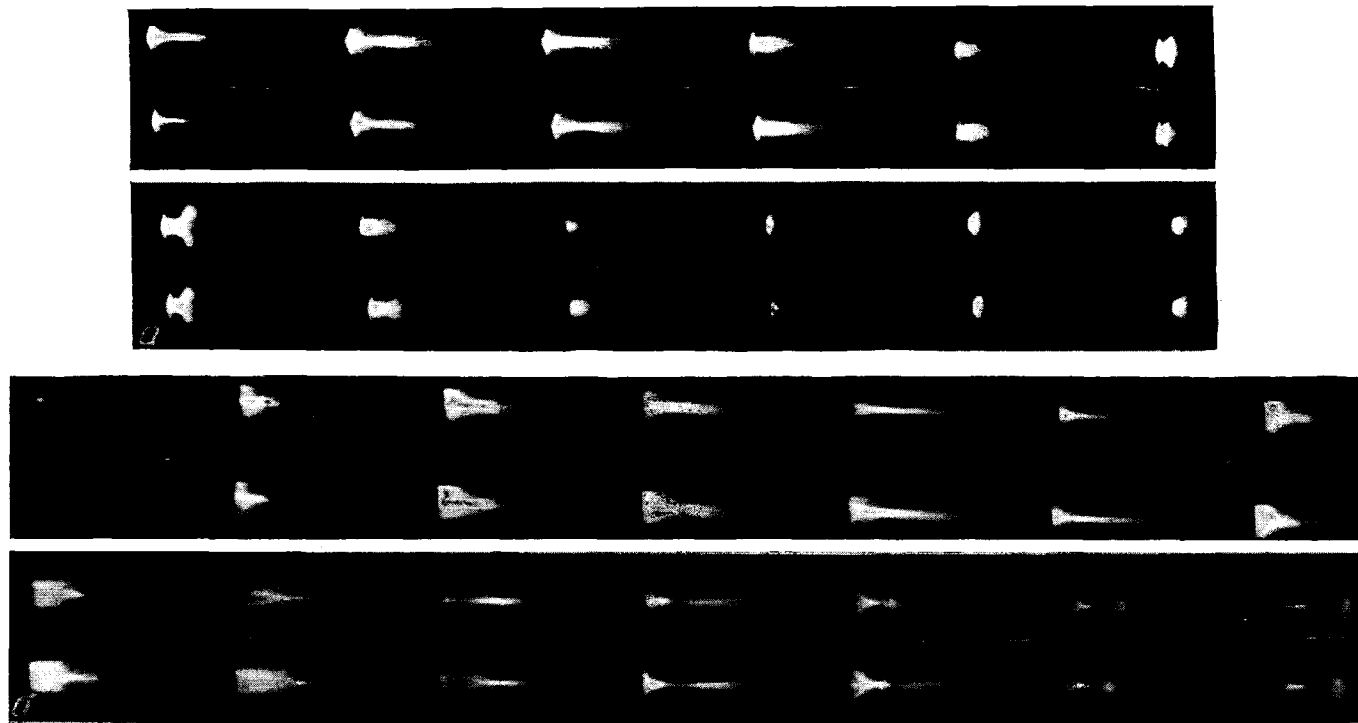


Рис. 1. Фотохронограммы открытого (а) и радиально ограниченного (б) разрядов: $U_0=5$ кВ, $W_0=9,4$ кДж, рабочее вещество CsI, интервал между кадрами 2 мкс

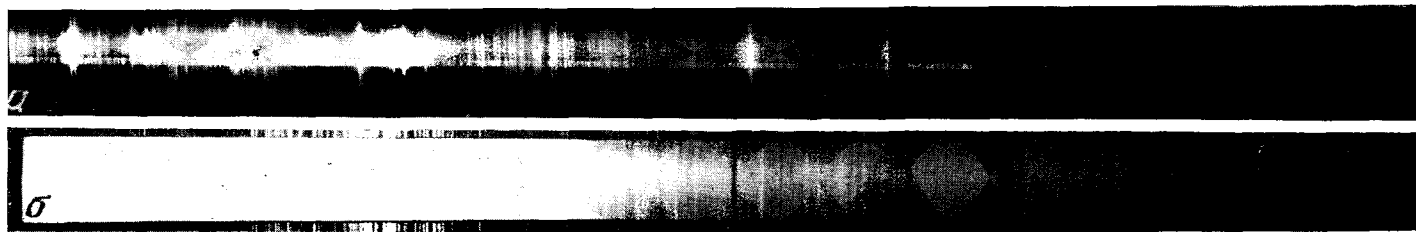


Рис. 5. Спектр излучения открытого (а) и радиально ограниченного ($d=60$ мм) (б) плазмодинамических разрядов:
 $U_0=5$ кВ, $W_0=9,4$ кДж, рабочее вещество — фторопласт-4

костью 750 мкФ. Напряжение на батарее изменялось в диапазоне 1—5 кВ. Индуктивность разрядной цепи, определенная из токовых измерений, составляла $\sim 40\text{--}50$ нГн.

Иницирование разряда осуществлялось маломощным инжектором плазмы типа Бостика, установленным в центральном электроде МПК. Исследования проводились в вакуумной камере, откачиваемой до давления $\sim 10^{-5}$ мм рт. ст.

Ток измерялся с помощью пояса Роговского, работающего в режиме трансформатора тока, и скомпенсированного *RC*-делителя.

Разряд носит колебательный характер, длительность первого полупериода составляет ~ 17 мкс, максимальное значение тока ~ 500 кА при скорости нарастания $di/dt \sim 8 \cdot 10^{10}$ А/с. Уменьшение сопротивления плазмы в разряде на CsI вызывает ухудшение согласования формирующей контура с нагрузкой, что выражается в уменьшении декремента затухания; длительность первого полупериода при этом практически не изменяется. Осциллографирование тока и напряжения разряда показывает, что радиальное ограничение не приводит к существенному изменению электротехнических параметров разряда: эффективность ввода запасенной электрической энергии в плазму составляет $\sim 70\text{--}80\%$.

Исследование динамики развития открытого и радиально ограниченного разрядов проводилось с помощью скоростного фоторегистратора СФР-2М, работающего в режиме лупы времени с частотой следования кадров $5 \cdot 10^5$. На рис. 1 (см. вкл.) даны результаты скоростной фотосъемки разрядов на CsI. Наличие стенок трубы, ограничивающих расширение потока, обуславливает существенные особенности течения. Особенно заметно это при использовании в качестве плазмообразующего вещества йодистого цезия, что связано с меньшим коэффициентом использования рабочего вещества [5] и большим выходом эрозионной массы в разряде на CsI по сравнению с разрядом на фторуглеродной плазме. Уменьшение коэффициента использования рабочего вещества приводит к тому, что значительная доля эрозионной массы (до 50%) не проходит через зону магнитогидродинамического сжатия потока (зону плазменного фокуса) и истекает из МПК в виде сверхзвуковой недорасширенной струи.

Таким образом, плазменный поток, истекающий из эрозионного МПК, характеризуется сложной структурой, обусловленной наличием сверхзвуковой (число $M \sim 2\text{--}3$) газодинамической струи плазмы и гиперзвуковой ($M \sim 5\text{--}10$ [6]) струи, сформированной за счет электромагнитных эффектов в межэлектродном зазоре и в выносных токах (эффект Холла и пинч-эффект) и характеризующейся существенно большими плотностью, температурой и скоростью истечения. Это обстоятельство в значительной степени отличает исследуемые течения от тех, что реализуются в импульсных эрозионных плазмотронах [7].

Изменения в картине течения, обнаруживаемые в каждый рассматриваемый момент времени, связаны с колебательным характером разряда. Для первого полупериода тока определяющим является процесс магнитогидродинамического формирования плазменного фокуса. Поджатие струи начинается на 3—4 мкс разряда, зона фокуса формируется со средней скоростью $5 \cdot 10^5$ см/с и максимальное сжатие наблюдается спустя 1—2 мкс после достижения максимума разрядного тока. При этом угол разлета струи составляет $18\text{--}20^\circ$. При взаимодействии расширяющейся струи с радиально ограничивающими стенками происходит отражение плазменного потока, приводящее к повышению давления в выходном сечении трубы и частичному запираению потока в канале. Дополнительная газодинамическая фокусировка потока за счет отражения от стенок трубы приводит к увеличению длины эффективной излучающей зоны плазменного фокуса.

К концу первого полупериода в связи с уменьшением разрядного тока роль сил магнитного давления уменьшается и наблюдается радиальное расширение струи под действием газокинетического давления. По мере

расширения плотность и температура частиц в струе падают, что отражается в уменьшении интенсивности свечения и видимого диаметра струи.

Во втором и третьем полупериодах тока становятся существенными газодинамические эффекты течения, значительно изменяющие структуру потока. Сжатая зона, образовавшаяся при вторичном питчевании разряда, действует на истекшую эрозионную плазму аналогично поршню, формируя конический светящийся фронт.

В последующие моменты времени в потоке образуется мостообразный скачок уплотнения, характерный для газодинамических недорасширенных радиально ограниченных течений при больших перепадах давления внутри разрядного устройства (МПК) и вне его.

Ограничение зоны компрессии трубами диаметром 100 мм не приводит к заметному изменению динамики развития разряда. При радиальном ог-

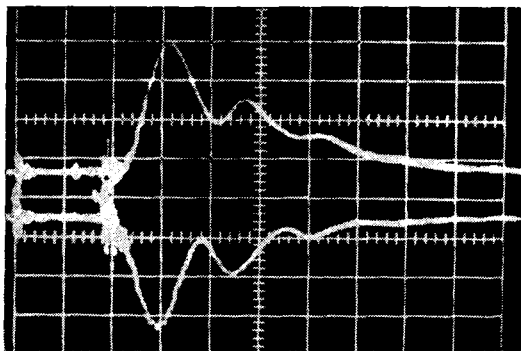


Рис. 2. Оциллограммы сигналов с фотоэлементов: $U_0=5$ кВ, $W_0=9,4$ кДж, рабочее вещество CsI; верхняя кривая – ФЭК-15 с фильтром КС-11, $\Delta h\nu=1,36-1,95$ эВ, масштаб по вертикали 2 МВт/дел.; нижняя кривая – Ф7 с УФС-1, $\Delta h\nu=4,35-5$ эВ, масштаб по вертикали 3,5 МВт/дел, развертка 10 мкс/дел

раничении плазменного фокуса трубами малого диаметра ($d=25$ мм) наблюдалось сильное запираение потока и значительное повышение давления в трубе, приводящее в отдельных случаях к ее разрушению.

Исследования спектрального распределения энергии излучения радиально ограниченного плазмодинамического разряда в ИК-, видимой и ближней УФ-областях спектра проводились с помощью набора калиброванных элементов. Фотоэлементы в комбинации с оптическими фильтрами разбивали спектральную область от 0,64 до 5 эВ на пять интервалов, близких к полосам поглощения наиболее распространенных активных лазерных сред. Калибровка фотоэлементов проводилась с помощью эталонного источника сплошного спектра ЭВ-45 по методике [8]. Сигнал с фотоэлемента пропорционален полной мощности излучения разряда в спектральном интервале, определяемом его областью чувствительности. Полная энергия излучения вычислялась интегрированием сигналов по времени.

На рис. 2 приведены характерные оциллограммы световых сигналов в ИК- (кривая 1) и ближней УФ- (кривая 2) областях спектра для разряда на CsI, ограниченного трубкой диаметром 60 мм. Сравнение с открытым разрядом показывает, что при ограничении зоны компрессии трубами с внутренним диаметром, близким к диаметру наружного электрода МПК, временной ход интенсивности излучения и форма светового импульса практически не изменяются. Влияние радиального ограничения на форму импульса проявляется лишь в уменьшении глубины модуляции светового сигнала при колебательном изменении разрядного тока. Длительность фронта светового импульса определяется только параметрами формирующего контура, не зависит от диаметра ограничивающей разряд трубы и для исследованных режимов составляет ~ 5 мкс. При значительном радиальном ограничении разряда (диаметр трубы много меньше диаметра наружного электрода) за счет запираения потока в трубе и диссипации кинетической энергии плазмы в излучение задний фронт светового импульса затягивается и длительность сигнала на полувысоте увеличивается.

Для разряда на фторуглеродной плазме длительность импульса излучения в УФ-области (4,35–5 эВ) при ограничении трубкой $d=60$ мм составляет по уровню $0,5 V_{\text{макс}} \sim 9$ мкс и возрастает до ~ 20 мкс при радиальном ограничении стенками $d=25$ мм (рис. 3).

Изменение начального напряжения на конденсаторной батарее в диапазоне 1–5 кВ не приводит к заметному изменению временного хода интенсивности излучения.

Влияние радиального ограничения разряда на спектральное распределение энергии излучения в полосе пропускания кварца показано на рис. 4 ($W_0=9,4$ кДж, труба $d=60$ мм). Для разряда на CsI энергия и мощность излучения увеличиваются примерно в два раза в ближней УФ-области спектра и в полтора раза в видимой части. При использовании в

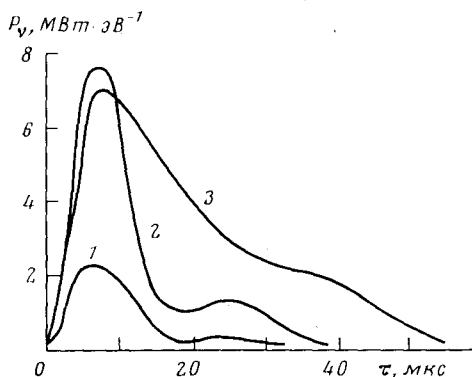


Рис. 3. Влияние диаметра ограничения разряда на форму импульса излучения: $U_0=5$ кВ, $W_0=9,4$ кДж, рабочее вещество ($-C_2F_4-$)_n, спектральная область $\Delta h\nu=4,35-5$ эВ: 1 — диаметр трубы $d=100$ мм (открытый разряд); 2 — 60; 3 — 25

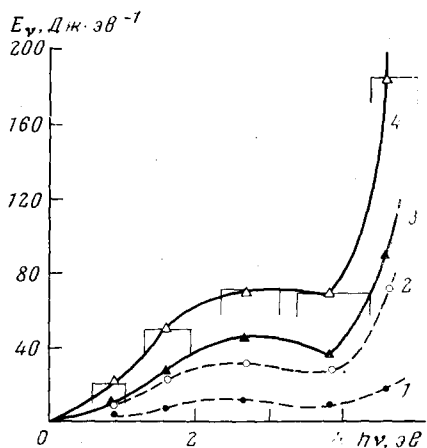


Рис. 4. Влияние радиального ограничения на спектральное распределение энергии излучения плазменного фокуса: $U_0=5$ кВ, $W_0=9,4$ кДж, открытый (1, 3) и радиально ограниченный ($d=60$ мм) разряды (2, 4), рабочее вещество ($-C_2F_4-$)_n, 1, 2 и (CsI), 3, 4

качестве плазмообразующего вещества фторопласта увеличение энергии и мощности излучения составляет в ближнем ультрафиолете $\sim 3,5$ раза и в видимой части примерно два раза. (Области спектральной чувствительности используемых фотоэлементов показаны прямоугольниками на рис. 4.)

Таким образом, радиальное ограничение плазодинамического разряда приводит к сдвигу спектра излучения в ближнюю УФ-область. Увеличение светового к.п.д. при радиальном ограничении разряда связано с возникновением в результате взаимодействия плазмы со стенками трубы отраженных ударных волн, приводящих к частичному запираанию потока в трубе (торможение плазмы и диссипация кинетической энергии) и дополнительной газодинамической фокусировке струи к оси системы (увеличение длины эффективной излучающей зоны фокуса). Кроме того, увеличение концентрации частиц в трубе может приводить к экранировке ВУФ-излучения плазменного фокуса и его переизлучению в видимой и ближней УФ-областях спектра. Этим, очевидно, объясняется большая эффективность радиального ограничения разряда на фторопласте, для которого экранировка коротковолнового излучения горячей зоны фокуса в открытом разряде за счет высоких коэффициентов использования рабочего вещества (75–85% [5]) значительно меньше, чем для CsI.

Спектр излучения плазмодинамического разряда в области $\Delta h\nu = 2-6$ эВ исследовался с помощью кварцевого спектрографа ИСП-30. Оптической системой центральная зона разряда одномасштабно проектировалась на щель прибора ($\delta = 20$ мкм). Для регистрации использовалась аэрофотоэмульсия типа 15-800. На рис. 5 (см. вкл.) даны спектры излучения открытого a и радиально ограниченного разряда b при величине запасаемой электрической энергии ~ 10 кДж (рабочее вещество — фторопласт-4).

В том и другом случае спектр излучения в основном сплошной, доля излучения в линиях, определенная по денситограммам спектра с использованием микрофотометра ИФО-451, не превышает нескольких процентов. Отличительной особенностью спектра радиально ограниченного разряда является наличие сильно уширенных линий поглощения, принадлежащих атому кремния и продуктам эрозии электродов и диэлектрической шайбы (СI, СII, CuI и др.). Появление линий поглощения в спектре разряда с радиальным ограничением свидетельствует с одной стороны о наличии холодного слоя плазмы, окружающего горячую зону разряда, с другой — об испарении поверхностного слоя кварца под действием мощного ВУФ-излучения плазменного фокуса. Линии поглощения атомов кремния проявляются в значительно меньшей степени при использовании в качестве плазмообразующего вещества CsI, что свидетельствует о большей экранировке коротковолнового излучения фокуса. Испарение кварца должно приводить, согласно [9], к появлению аномально большого поглощения УФ-излучения на границе кварц — плазма, однако тот факт, что длительность импульса излучения как в УФ-, так и в видимой областях спектра не изменяется при наличии радиального ограничения по сравнению со случаем без ограничения, не позволяет однозначно сделать вывод о наступлении обратимой непрозрачности кварца. Этот вопрос требует дополнительного исследования с использованием диагностической аппаратуры с временной регистрацией спектров излучения.

Зависимость мощности излучения радиально ограниченного разряда от напряжения на конденсаторной батарее (в диапазоне 1-5 кВ) в видимой и ближней УФ-областях спектра для различных плазмообразующих веществ ($-C_2F_4-$, CsI) близка к кубической, что определяет почти линейный рост светового к.п.д. с увеличением запасаемой электрической энергии.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что радиально ограниченный плазмодинамический разряд типа «плазменный фокус» может быть использован в качестве высокоинтенсивного источника излучения в видимой и ближней УФ-областях спектра. Пиковая мощность УФ-излучения ($\Delta h\nu = 4,35-5,0$ эВ) разряда на CsI более чем в два раза превышает мощность излучения стандартной ксеноновой лампы ИФП-20 000, работающей в режиме коротких импульсов ($\tau \sim 100$ мкс) при предельно допустимых нагрузках [4]. При этом, если, как показано в [4], для лампы возможности дальнейшего повышения излучаемой мощности за счет форсирования энергетического режима работы практически исчерпаны, радиально ограниченный разряд вследствие наличия магнитного поджатия струи и значительной осевой составляющей скорости потока допускает существенное (на несколько порядков) увеличение вкладываемых электрических мощностей и энергий без опасности разрушения ограничивающих разряд прозрачных стенок. Это позволяет достигать высоких яркостных температур и мощностей излучения разряда в видимой и ближней УФ-областях спектра, причем, так как крутизна переднего фронта светового импульса определяется только параметрами формирующего контура, то низкая собственная индуктивность МПК (вследствие коаксиальной геометрии электродной системы) дает возможность реализовать минимальные ($\tau_{\phi} < 1$ мкс [10]) времена нарастания импульсов света.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Козлов, Л. В. Лесков, Ю. С. Протасов, В. И. Хвесюк. ТВТ, 11, 191, 1973.
 2. Н. П. Козлов, Л. В. Лесков, Ю. С. Протасов, В. И. Хвесюк. ЖТФ, 43, 730, 1973.
 3. В. Д. Зворыкин, Г. Н. Кашников, А. Д. Клементов, Н. П. Козлов, В. А. Малащенко, Ю. С. Протасов, В. Б. Розанов. Квантовая электроника, 2, 2416, 1975.
 4. А. С. Камруков, Г. Н. Кашников, Н. П. Козлов, В. А. Малащенко, Ю. С. Протасов. ЖПС, 23, 393, 1975.
 5. Н. П. Козлов, Л. В. Лесков, Ю. С. Протасов, В. И. Хвесюк. ЖТФ, 44, 2519, 1974.
 6. Н. П. Козлов, Л. В. Лесков, Ю. С. Протасов, В. И. Хвесюк, В. В. Яминский. ТВТ, 12, 697, 1974.
 7. Л. Я. Минько. Получение и исследование импульсных плазменных потоков. «Наука и техника», Минск, 1970.
 8. В. В. Еремин, А. Д. Клементов. Препринт ФИАН СССР, № 127, 1971.
 9. С. Н. Белов, М. И. Демидов, Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский, Н. Н. Роговцев, В. М. Шелепина. ЖПС, 10, 408, 1969.
 10. В. А. Алексеев, Н. П. Козлов, Ю. С. Протасов, А. Н. Рубинов. Письма в ЖЭТФ, 20, 716, 1974.
-