

## УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ МАГНИТОПРИЖАТОГО РАЗРЯДА МЕГАВАТТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

© 2014 г. А. Г. Бедрин, канд. физ-мат наук; В. М. Громовенко, канд. техн. наук;  
И. С. Миронов, канд. тех. наук

Научно-исследовательский институт оптико-электронных приборов, г. Сосновый Бор,  
Ленинградская область

E-mail: 46@niiki.ru

Для плазменного источника света на основе магнитоприжатого разряда, работающего в режиме с длительностью импульса разрядного тока, равной 1 с, вводимой электрической мощностью около 1 МВт исследованы возможности формирования временной зависимости и энергетических характеристик излучения при питании от сетевого тиристорного выпрямителя с выходным напряжением порядка 500 В и током разряда до 6000 А. Показано, что увеличение в составе плазмообразующего материала доли легкоионизуемых элементов (Na, Ca, La) ведет к увеличению энергетической светимости плазменного излучателя. Выявлено оптимальное значение индукции прижимающего магнитного поля.

**Ключевые слова:** магнитоприжатый разряд, плазменный излучатель, тиристорный выпрямитель, магнитное поле, потенциал ионизации.

Коды OCIS: 230.6080; 350.5400.

Поступила в редакцию 14.05.2014.

Для решения широкого круга технических задач в фотохимии, осветительной технике, световых технологиях обработки материалов, при испытаниях материалов, приборов, образцов техники на устойчивость к воздействию светового излучения природных и техногенных факторов требуются излучатели с широким диапазоном параметров, с различным спектральным составом излучения и с режимами работы от импульсных, с длительностью свечения порядка  $10^{-6}$ – $10^{-1}$  с, до непрерывных.

Плазменные излучатели, созданные по принципу разрядов с испаряемой стенкой, могут работать как в импульсном, так и в длительном квазинепрерывном режиме. К их числу относится электрический разряд, прижатый внешним магнитным полем к ограничивающей не-проводящей стенке – магнитоприжатый разряд (МПР).

Принцип действия МПР заключается в следующем [1]. Разряд происходит в лотке из плазмообразующего материала, ток разряда перекрещивается с внешним магнитным полем так, что под действием пондеромоторной силы  $F \sim j \times B$  (здесь  $j$  – плотность тока,  $B$  – индук-

ция внешнего магнитного поля) канал разряда прижимается к дну лотка. В результате джоулева нагрева происходит испарение материала стенок и дна лотка. Нарабатываемая плазма в виде двух симметричных струй истекает через открытые торцы лотка. Таким образом, канал разряда оказывается с трех сторон ограничен твердой стенкой, а с четвертой, открытой стороны обжат магнитным полем. Прижимающее магнитное поле может генерироваться как внешними источниками, так и собственным током, протекающим по шинам, параллельным разряду. В последнем случае пондеромоторное давление пропорционально квадрату тока разряда.

На основе МПР разработаны импульсный [2] и квазинепрерывный [3–5] излучатели. Параметры излучателей приведены в табл. 1.

Источником питания импульсного излучателя с длительностью импульса  $\tau \approx 10^{-3}$  с, энергетической светимостью  $M_e \approx 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, площадью излучающей поверхности  $S_r$  до 150 см<sup>2</sup> служит емкостной накопитель. Прижимающее магнитное поле создается катушкой, включенной последовательно с разрядным каналом.

**Таблица 1.** Параметры плазменных излучателей на основе МПР

Параметр	импульсный	квазинепрерывный
Габариты плазменного канала, см	$20 \times 6,5 \times 2$	$8 \times 2 \times 2$
Ток разряда, А	до $3 \times 10^5$	до $6 \times 10^3$
Яркостная температура, К	до $3 \times 10^4$	до $6 \times 10^3$
Энергетическая светимость, Вт/см <sup>2</sup>	до $10^6$	до $10^4$
Длительность светового импульса, с	до $3 \times 10^{-3}$	до 1

В качестве плазмообразующего материала в источнике света на основе МПР используется фибра – химическая формула  $(\text{CH}_2\text{O})_n$ . Она содержит одинаковое количество атомов углерода и кислорода, поэтому при охлаждении продуктов высокотемпературной эрозии фибры в оболочке разряда образуется угарный газ CO, и практически отсутствуют частицы сажи, экранирующие излучение.

При амплитуде разрядного тока около 300 кА давление в плазме достигает  $10^7$  Па. Плазма импульсного МПР оказывается полностью ионизованной, а его излучение близко к излучению абсолютно черного тела (АЧТ). Управление параметрами излучения МПР в этом режиме осуществляется изменением амплитуды и формы импульсов разрядного тока [2].

Питание квазинепрерывного излучателя осуществляется от тиристорного выпрямителя электрической мощностью  $P = 3$  МВт. Выпрямитель обеспечивает в течение нескольких секунд на низкоомной нагрузке ток  $I \approx 6000$  А при напряжении  $U \approx 500$  В. Такая электрическая мощность обеспечивает площадь излучающей поверхности МПР

$$S_r = P\eta / \sigma T^4,$$

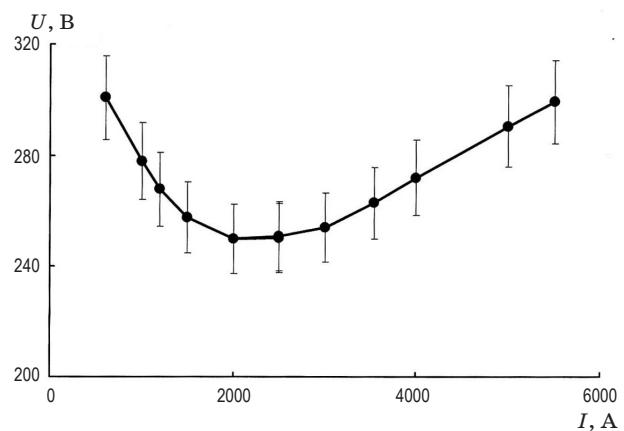
где  $\eta$  – световой КПД разряда,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $T$  – температура плазмы. При реальном  $\eta \approx 0,1$  и  $T = 6000$  К площадь излучающей поверхности составит  $S_r = 15$  см<sup>2</sup>. Линейная плотность тока, способная обеспечить требуемую температуру плазмы, составляет  $I/b \approx 2,5\text{--}3$  кА/см (здесь  $b$  – ширина канала разряда) [6]. При питании МПР от такого выпрямителя ширина канала разряда может быть  $b \approx 2$  см и, соответственно, длина  $l \approx 8$  см. Давление в плазме не превышает  $10^6$  Па, спектр излучения линейчатый со слабым сплошным

фоном. В таком режиме работы МПР характеристики его излучения определяются током разряда, составом плазмообразующей подложки и индукцией внешнего магнитного поля.

При исследовании работы тиристорного выпрямителя на плазменную нагрузку было показано, что приращение выходного тока выпрямителя пропорционально приращению управляющего сигнала, если его значение превышает пороговый, который в нашем случае составляет примерно 3 В. В области от порогового до максимального управляющего напряжения выходные параметры выпрямителя на плазменной нагрузке пропорциональны разности приложенного и порогового управляющего напряжения.

Из-за расширения канала разряда с ростом тока обычный дуговой разряд обладает падающей вольт-амперной характеристикой (ВАХ), что налагает ограничение на увеличение его энергетической светимости. Экспериментально полученная ВАХ для МПР представлена на рис. 1. Видно, что в области токов до 6000 А ВАХ возрастает. Минимальное напряжение на разряде, равное 250 В, реализуется при токе около 2000 А. При меньших токах разряд становится неустойчивым и быстро гаснет при отсутствии возможности поднятия на нем напряжения, на что указывает существование ниспадающей части ВАХ в области токов меньше 2000 А.

С увеличением разрядного тока до 6000 А падение напряжения на разряде достигает 300 В. То есть падение напряжения на разряде при изменении тока в три раза от 2000 до 6000 А составляет не более 15%. Таким образом, можно считать, что выделяющаяся в разряде мгновенная мощность определяется значением разрядного тока в этот же момент времени. Поэтому



**Рис. 1.** Экспериментальная ВАХ магнитоприводного разряда.

форма светового импульса МПР должна с высокой точностью соответствовать форме импульса тока. Это подтверждается рис. 2 и 3, на которых представлены временные зависимости управляющего напряжения тиристорного выпрямителя  $U_{\text{mtr}}$ , разрядного тока  $I$  и энергетической светимости  $M_e$  в спектральном диапазоне 300–1100 нм.

Экспериментальные исследования и оценка параметров источника излучения на основе МПР показали, что для получения плазмы, излучающей как АЧТ в разряде с подложкой из фибры, требуется высокие температуры и давления ( $T > 20000$ ,  $P > 10^7$  Па). Это связано с тем, что элементы, входящие в состав плазмообразующего материала – С, О, Н – обладают высокими потенциалами ионизации. Получение в такой плазме концентраций ионов  $n_i$  и электронов  $n_e > 10^{18}$  см<sup>-3</sup> обеспечивается при линейной плотности тока МПР  $I/b > 40$  кА/см и индукции внешнего магнитного поля  $B = 2$ –4 Тл.

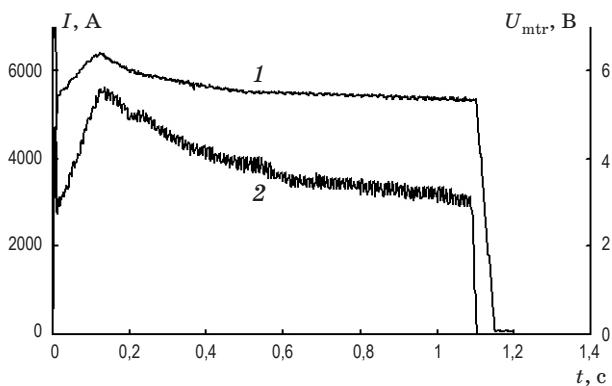


Рис. 2. Временные зависимости управляющего напряжения тиристорного выпрямителя (1) и тока разряда (2).

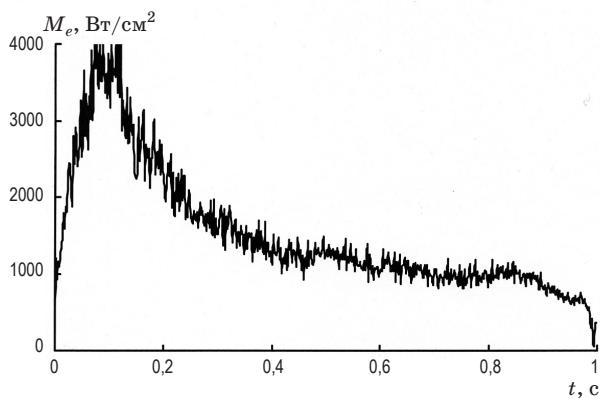


Рис. 3. Временная зависимость энергетической светимости МПР.

Получение плазмы, излучающей как АЧТ при температурах порядка 6000 К, характерных для вкладываемой в МПР электрической мощности около 1 МВт, возможно, если элементы, образующие плазму, имеют низкие потенциалы ионизации. При увеличении  $n_e$  и  $n_i$  излучательная способность плазмы  $\varepsilon$  возрастает, так как для сплошного излучения  $\varepsilon \approx n_e n_i Z^2$ , где  $Z$  – заряд иона. Поэтому для увеличения излучательной способности низкотемпературной плазмы необходимо использовать плазмообразующие материалы, содержащие элементы с низкими потенциалами ионизации. Кроме того, желательно, чтобы выбранные элементы имели слабо развитый дуговой спектр, чтобы уменьшить поглощение в спектральных линиях холодной оболочки разряда. Материал плазмообразующей подложки должен обладать достаточной механической и тепловой прочностью и выдерживать кратковременное (до 1 с) воздействие плазмы, нагретой до  $T \approx 6000$  К. В качестве таких материалов могут быть использованы керамика, содержащая сульфиды и оксиды редкоземельных элементов, мрамор, состоящий в основном из  $\text{CaCO}_3$ , кристаллы  $\text{NaCl}$  и некоторые виды стекол с высоким содержанием  $\text{PbO}$ , например, ТФ-12.

Электрические характеристики разряда для всех перечисленных материалов оказались одинаковыми в пределах погрешности измерений. При токе разряда 6000 А напряжение на разрядном промежутке достигало 300 В, сопротивление плазменного канала 0,055 Ом, вкладываемая мощность достигает 1,8 МВт.

Различия параметров излучения МПР с разными подложками объясняются характеристиками плазмообразующих материалов (табл. 2). Максимальная энергетическая светимость  $M_e$  получена в разряде с подложкой из  $\text{NaCl}$ . В этом материале – наибольшее содержание легкоионизуемого элемента, и потенциал ионизации  $\text{Na}$  – самый низкий в ряду опробованных материалов.

Плазменный источник с подложкой из  $\text{NaCl}$  имеет одинаковые яркостные температуры  $T_b = (6500 \pm 500)$  К во всем исследованном спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 300$ –1100 нм. Энергетическая светимость плазменного источника в этом спектральном диапазоне  $M_e = 9300$  Вт/см<sup>2</sup>, в то время, как для плазмы МПР, образованной при эрозии фибры,  $M_e = 4000$  Вт/см<sup>2</sup>.

В спектре плазмы из  $\text{NaCl}$  наблюдается небольшое количество линий в излучении и поглощении. Наиболее интенсивные линии  $\text{Na}$

Таблица 2. Характеристики плазмообразующих материалов

Материал	Элемент	Потенциал ионизации, эВ	Доля элемента, %	$M_e$ , Вт/см <sup>2</sup>
NaCl	Na	5,14	50	9300
CaCO <sub>3</sub>	Ca	6,11	20	8500
La <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	La	5,61	40	8000
Стекло ТФ-12	Pb	7,42	15	3200
Фибра	C, O, H	11,3–13,6	100	4000

лежат в дальней ИК области (за исключением резонансного дублета 589,6/589,0 нм).

Минимальная энергетическая светимость в ряду опробованных материалов получена при использовании подложки из стекла ТФ-12. В нем содержание элемента с относительно низким потенциалом ионизации наименьшее, а сам потенциал ионизации наибольший. Для этого материала плотность потока излучения приблизительно в 2 раза ниже, чем для других материалов.

Несмотря на то, что доля легкоионизуемого элемента в керамике сульфида лантана в 2 раза выше, чем в мраморе,  $M_e$  для La<sub>2</sub>S<sub>3</sub> оказывается ниже, чем для CaCO<sub>3</sub>. Это объясняется особенностями спектров Ca и La. Спектр Ca беден линиями, в то время как La обладает спектром с очень большим количеством линий. Кроме того, La эффективно образует оксид LaO в относительно холодной оболочке, окружающей плазменный канал разряда. В спектральном диапазоне 400–600 нм LaO сильно ослабляет излучение разряда за счет поглощения в молекулярных полосах.

Изменение индукции внешнего магнитного поля при относительно большой амплитуде разрядного тока, характерной для импульсного режима работы плазменного излучателя на основе МПР, не оказывает существенного влияния на вкладываемую в разряд электрическую мощность  $P$ . Заметным влияние  $B$  на  $P$  становится при малых (меньших 15 кА) амплитудах разрядного тока. Теоретические оценки параметров МПР с габаритами плазменного канала 8×2×2 см<sup>3</sup> проводились при допущении, что излучение разряда близко к излучению АЧТ, по методу, изложенному в [7]. В расчетах была использована модель стационарного плоского плазменного слоя без газодинамических возмущений. Проведенные расчетные оценки показали, что при увеличении индукции внешнего магнитного поля  $B$  энергетическая светимость плазменного излучателя  $M_e$  растет.

Однако увеличение индукции внешнего магнитного поля и пондеромоторного давления в плазме может существенным образом менять картину движения плазмы в разрядном промежутке. Возникают течения плазменных струй не только в сторону электродов, но и в направлении, перпендикулярном излучающей поверхности. Эти потоки остигающей плазмы вызывают экранировку излучения, уменьшая энергетическую светимость плазменного излучателя. Поэтому для квазистационарного режима работы плазменного излучателя особенно важным оказывается подбор оптимального значения индукции внешнего прижимающего магнитного поля.

Измерение характеристик излучения плазменного источника света на основе МПР в квазистационарном режиме при вариации индукции внешнего магнитного поля от 0 до 2 Тл показывает, что  $M_e$  и энергия излучения  $E_r$  меняется в 4–8 раз. Калориметрические измерения энергии облучения  $E_{ir}$  также подтверждают наличие оптимального для каждого режима работы МПР значения  $B$ . На рис. 4 приведены зависимости  $E_r$  и  $E_{ir}$  от индукции магнитного поля для режима работы плазменного излучателя с вкладываемой электрической мощностью 2 МВт.

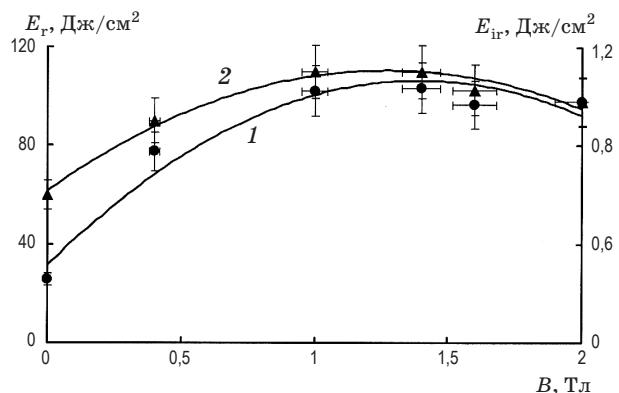


Рис. 4. Зависимости  $E_r$  (1) и  $E_{ir}$  (2) от  $B$ .

Такие изменения не могут быть объяснены соответствующим поведением электрических характеристик МПР, поскольку относительное изменение вкладываемой в разряд электрической мощности в тех же условиях не превышает 50%.

Немонотонное влияние индукции внешнего магнитного поля на излучательные характеристики МПР в экспериментах может быть объяснено тем, что увеличение  $B$  и пондеромоторного давления в плазме вызывает рост коэффициентов поглощения плазмы. Это приводит к увеличению оптической толщины плазменного слоя  $\gamma$  и к экспоненциальному росту  $M_e \approx (1 - \exp(-\gamma))$ . С другой стороны, увеличение  $B$  и пондеромоторного давления в разряде существенным образом меняет картину движения плазмы в разрядном промежутке. Усиливаются течения плазменных струй в направлении, перпендикулярном излучающей поверхности. Эти потоки остывающей плазмы вызывают экранировку излучения, уменьшая

энергетическую светимость плазменного излучателя. Противодействие двух факторов – увеличение  $M_e$  за счет роста  $\gamma$  и уменьшение  $M_e$  за счет возрастающей экранировки – приводит к тому, что для каждого режима работы плазменного излучателя на основе МПР появляется оптимальное значение индукции внешнего магнитного поля.

В диапазоне изменения тока 5–10 кА значения индукции магнитного поля, обеспечивающие максимальный для данного режима работы плазменного источника выход излучения, лежат в диапазоне 1,2–1,6 Тл [8].

Таким образом, проведенные исследования показали, что управление характеристиками излучения МПР может осуществляться изменением амплитуды и формы разрядного тока, использованием плазмообразующих материалов, содержащих легкоионизуемые элементы, и подбором оптимального значения индукции внешнего магнитного поля.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горшкова Л.Д., Горшков В.А., Подмошенский И.В. Получение плазмы в разряде, прижатом к стенке магнитным полем // ТВТ. 1968. Т. 6. № 6. С. 1130–1132.
2. Калачников Е.В., Миронов И.С., Роговцев П.Н. Исследование динамики излучения сильноточного магнитоприжатого разряда // ТВТ. 1986. Т. 2. № 5. С. 837–843.
3. Бедрин А.Г., Дащук С.П., Миронов И.С. Квазинепрерывный источник излучения на основе магнитоприжатого разряда // ТВТ. 2007. Т. 45. № 2. С. 182–186.
4. Бедрин А.Г., Дащук С.П., Миронов И.С. Мощный плазменный излучатель для импульсного и непрерывного облучения // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 3. С. 22–26.
5. Бедрин А.Г., Миронов И.С. Способ получения плазменного источника излучения и устройство для его осуществления // Патент России № 2370002. 2009.
6. Горшкова Л.Д., Миронов И.С., Подмошенский И.В. Электромагнитные характеристики и баланс энергии Н-прижатого разряда // ТВТ. 1978. Т. 16. № 6. С. 1130–1133.
7. Миронов И.С., Роговцев П.Н. Полуэмпирическая модель сильноточного магнитоприжатого разряда // Тезисы докладов IV Межгосударственного симпозиума по радиационной плазмодинамике. М.: МГТУ, 1997. С. 140–141.
8. Бедрин А.Г., Миронов И.С. Влияние индукции внешнего магнитного поля на излучательные характеристики магнитоприжатого разряда // Сб. научных трудов XI межд. симп. по радиационной плазмодинамике. М.: НИЦ “Инженер”, 2012. С. 121–125.