

УДК 621.316.543

**ЗАПОЛНЕНИЕ ЗАЗОРА ПЛАЗМЕННОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА
ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПЛАЗМОЙ
ЭЛЕКТРОВЗРЫВАЕМОЙ ПРОВОЛОЧКИ****© 2013 г. Г. И. Долгачев, Ю. Г. Калинин, Д. Д. Масленников,
А. С. Федоткин, И. А. Ходеев, А. А. Шведов***Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”**Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

Поступила в редакцию 12.08.2012 г.

Рассмотрена динамика заполнения межэлектродного зазора плазменного прерывателя тока (п.п.т.) с помощью электровзрываемой проволоочки диаметром 4 мкм (вольфрам) и 6 мкм (углерод). Проволочка подсоединялась к коаксиальным электродам п.п.т. перпендикулярно силовым линиям продольного магнитного поля, создаваемого внешним источником. При пропускании через проволоочку тока продольная скорость образующейся плазмы составляла $\approx 10^6$ см/с, азимутальная — $\approx 10^7$ см/с (вольфрам) и $\geq 1.3 \cdot 10^7$ см/с (углерод). В итоге образовывалась плазменная “шайба”, полное количество частиц в которой определялось параметрами проволоочки и зазора п.п.т. Этот результат — первый шаг в решении проблемы “первого выстрела”.

DOI: 10.7868/S0032816213040058

1. ВВЕДЕНИЕ

В программе создания сверхмощных генераторов для экспериментов в области инерциального управляемого термоядерного синтеза (установка МОЛ в программе “Байкал” [1], взрывомагнитные генераторы [2]) в качестве конечной ступени обострения мощности предполагается использовать плазменный прерыватель тока (п.п.т.) во внешнем магнитном поле — продольном магнитном поле, создаваемом внешним источником [3]. П.п.т. представляет собой два коаксиальных электрода, включенных в цепь индуктивного накопителя. Зазор между электродами заполняется плазмой с помощью плазменных пушек (см. обзор [4]). Существует множество вариантов пушек, но все они используют поверхностный пробой диэлектрика, генерирующий поток плазмы, направленный в зазор п.п.т. Внешнее магнитное поле существенно повышает эффективность работы п.п.т. Одно из условий его работоспособности — получение оптимальных параметров плазмы, создаваемой плазменными пушками. Выход на оптимальный режим работы п.п.т., т.е. получение необходимой плотности плазмы (10^{13} – 10^{14} см⁻³), требует некоторого количества наладочных пусков, которые на крупных установках достаточно дороги. Поэтому проблема выхода на режим с первого раза без предварительных импульсов по подбору оптимальных параметров плазмы, т.е. проблема первого “выстрела”, является актуальной. Она особенно важна при обострении мощ-

ности взрывомагнитных генераторов, где первый “выстрел” является и последним.

Для решения этой проблемы можно шунтировать межэлектродный зазор п.п.т. тонкой (\varnothing 2–6 мкм) проволоочкой, взрываемой током п.п.т. При этом необходимые для включения механизма обрыва тока параметры плазмы в зазоре п.п.т. могут быть получены за счет выбора материала, диаметра проволоочки и ее разлета в зазоре п.п.т. Правильный подбор параметров проволоочки, обеспечивающий необходимую плотность плазмы, позволит заменить плазменные пушки на электровзрываемый проводник (э.в.п.) и сразу получать оптимальный режим п.п.т. Следует отметить, что аббревиатура э.в.п. ассоциируется с прерывателями тока типа “плавкого предохранителя”, которые применяются в мощных ускорителях, при этом диаметр проволоочек ~ 1 мм, а длина достигает 10 м [5]. Электропрочность проволоочки при взрыве (в кварцевом песке или газе) достигает 0.5–1 МВ/м. И хотя схемы включения э.в.п. в ускорителе и в п.п.т. очень близки, они выполняют в них разные роли. В ускорителе э.в.п. — основной прерыватель, он взрывается в максимуме тока, в плазменных прерывателях э.в.п. — источник плазмы, он взрывается при токе на уровне 10 А, т.е. в самом начале импульса тока, обрыв которого происходит значительно позже взрыва проволоочки при величине тока на уровне десятков килоампер. Электропрочность зазора п.п.т. при его оптимальном срабатывании достигает 0.5 МВ/см. Про-

волочки в п.п.т. скорее напоминают проволоочки лайнера — “белычьего” колеса из параллельных микрометровых вольфрамовых проволоочек, плазма которых сжимается к оси при прохождении по ней мощного импульса тока (до десятков мегаампер) и нагревается [6].

При взрыве э.в.п. в зазоре п.п.т. изначально высокая локально сконцентрированная плотность электровзрывной плазмы будет “размазываться” в кольцевом зазоре по углу за счет силы Ампера $\mathbf{F} = \mathbf{I} \times \mathbf{B}$, как это наблюдалось в [7]. Кроме того, как отмечалось там же, падающая во времени за счет азимутального “размазывания” плотность частиц (от $\sim 10^{23}$ до $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$) в зазоре п.п.т. открывает возможность решить характерную для программы “Байкал” [1] проблему длинного (~ 40 мкс) предимпульса.

Данная работа посвящена изучению динамики плазмы при взрыве проволоочки в аксиальном магнитном поле, создаваемом внешним источником ($B_z \leq 30$ кГс), и является первым шагом в решении проблемы “первого” выстрела. С помощью электронно-оптических преобразователей (э.о.п.) [8] изучалась динамика азимутального и продольного распространения свечения плазмы, с помощью электротехнических методов — динамика изменения сопротивления плазмы, создаваемой при взрыве проволоочки. Эксперименты проводились на стенде [7] и установке РС-20 [9].

2. ВЫБОР ПРОВОЛОЧКИ

С точки зрения работы п.п.т. следует выбирать материал проволоочек из легких элементов, например полиэтиленовые нити. В нашем распоряжении были только углеродные ($\varnothing 6$ мкм) и вольфрамовые ($\varnothing 4$ мкм) проволоочки. Если считать, что при взрыве проволоочки в зазоре п.п.т. за счет ее разлета образуется плазменная шайба с продольным размером ~ 1 см, то в геометрии наших электродов (рис. 1) оценка плотности плазмы n дает величину на уровне $\sim 4 \cdot 10^{14}$ и $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$ для углеродной и вольфрамовой проволоочек соответственно, т.е. величину плотности, близкую к необходимой. Энергия на испарение и однократную ионизацию этих проволоочек ничтожно мала: $7.7 \cdot 10^{-6}$ и $2.2 \cdot 10^{-6}$ Дж/см. И хотя углеродная проволоочка предпочтительнее для п.п.т., основная масса экспериментов выполнена с вольфрамовой проволоочкой. Это связано с более простой технологией ее установки.

3. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент по изучению динамики образования плазмы при взрыве тонкой проволоочки во внешнем магнитном поле B_z , создаваемом сторон-

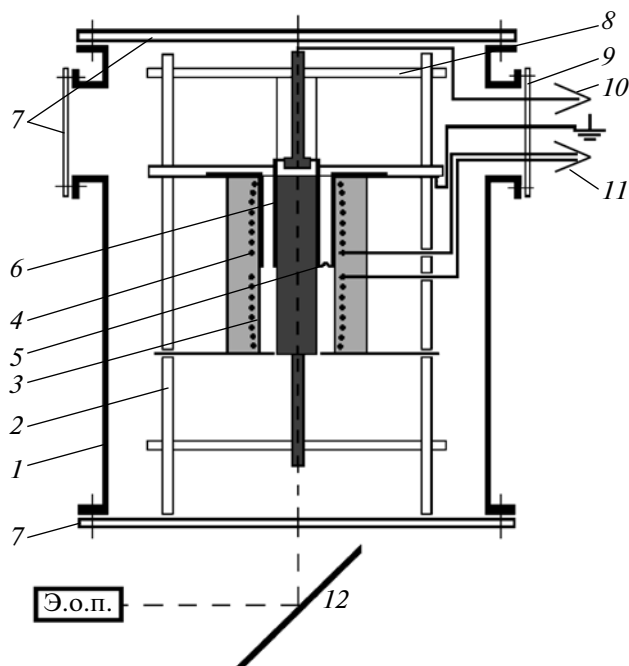


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — вакуумная камера ($h = 55$ см, $d = 35$ см, $P = 8 \cdot 10^{-6}$ Торр); 2 — изоляционные стойки; 3 — катод п.п.т. ($\varnothing = 8$ см); 4 — соленоид; 5 — взрывающаяся проволоочка; 6 — анод п.п.т. (медь, $\varnothing = 4$ см); 7 — смотровые фланцы; 8 — соединительный изолятор опоры; 9 — выводящий фланец; 10 — кабели питания анода; 11 — кабели питания соленоида; 12 — зеркало; э.о.п. — электрооптический преобразователь.

ним источником, проводился на макете (рис. 1 и 2) установки [7].

Медный анод п.п.т. 6 (рис. 1) через выводящий изоляционный фланец 9 подключался к анодной батарее. Емкость анодной батареи составляла 10 мкФ (4 конденсатора ИК-100-2,5), рабочее напряжение 25 кВ, полупериод контура “батарея — проволоочка” $T/2 = 12$ мкс. Для обеспечения проникновения внешнего магнитного поля в зазор п.п.т. корпус катода 3 выполнен из нержавеющей трубы с толщиной стенки 15 мм. Внутренний диаметр катода 80 мм.

Квазистационарное магнитное поле ($T/2 \approx 140$ мс) создается соленоидом 4 из двух катушек, крайние выводы которых заземлены на корпус катода, противоположные — соединены между собой и с кабелем питания 11. Такая конструкция позволяет максимально приблизить соленоид к зазору п.п.т. на краях катода, обеспечить симметрию магнитного поля и надежную изоляцию высоковольтных выводов соленоида. Обмотка соленоида изолирована от корпуса катода стеклотканью Т-10-14(92), пропитанной эпоксикремниевой смолой,

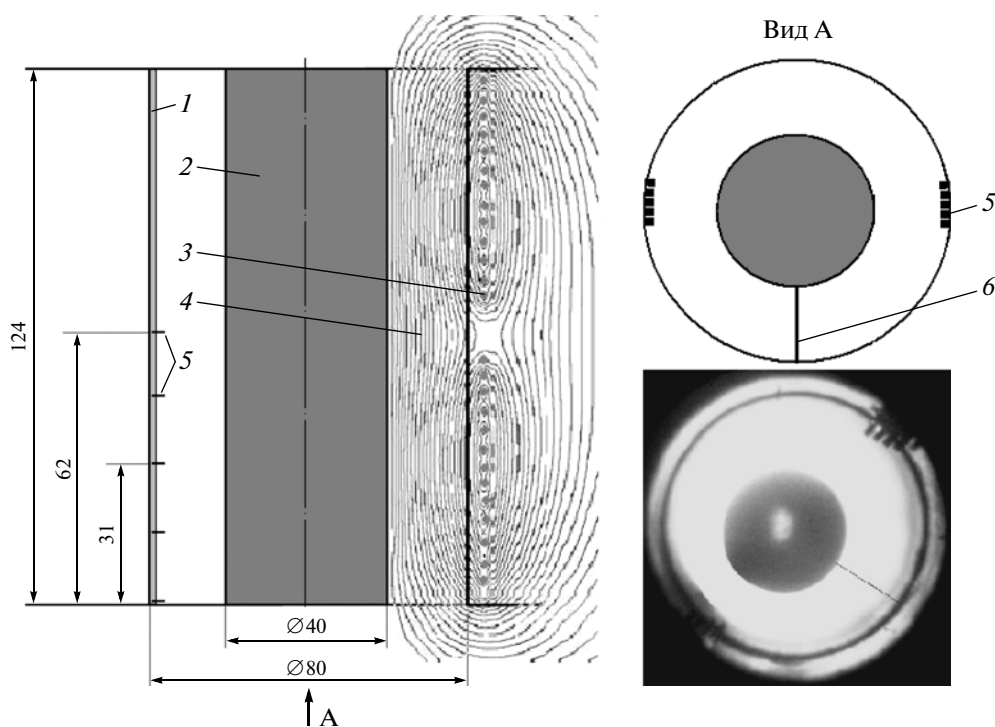


Рис. 2. Схема макета п.п.т. и фотография свечения зазора п.п.т. 1 – корпус катода; 2 – анод; 3 – витки соленоида внешнего магнитного поля; 4 – распределение магнитного поля B_z в зазоре п.п.т.; 5 – затеняющие пластинки (15 мм друг от друга вдоль оси и 1 мм по азимуту); 6 – электровзрываемая проволочка.

допускающей нагрев до $\sim 250^\circ\text{C}$. Питание соленоида осуществляется от батареи с полной емкостью 1400 мкФ и напряжением до 45 кВ. После прохождения первого полупериода тока батарея с помощью дополнительного ключа (игнитрон ИРТ-6) шунтировалась низкоомным резистором, сопротивление которого $R \leq \rho$, где ρ – характеристическое сопротивление контура “батарея – со-

леноид”. Сопротивление R поглощало основную часть энергии батареи.

Магнитное поле соленоида измерялось с помощью трех петель, расположенных в одной плоскости и перемещаемых вдоль оси, что позволило получить распределение аксиального поля B_z в зазоре п.п.т., которое хорошо совпадает с результатом компьютерного расчета (силовые линии 4 на рис. 2).

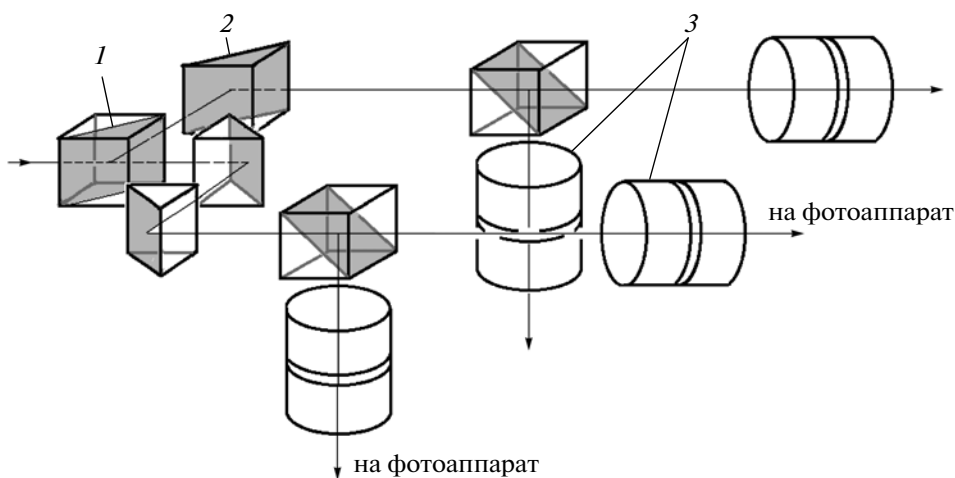


Рис. 3. Схема светоделительной части. 1 – светоделительный куб (3 шт.); 2 – светоотражающая призма (3 шт.), 3 – сборки э.о.п. (4 шт.).

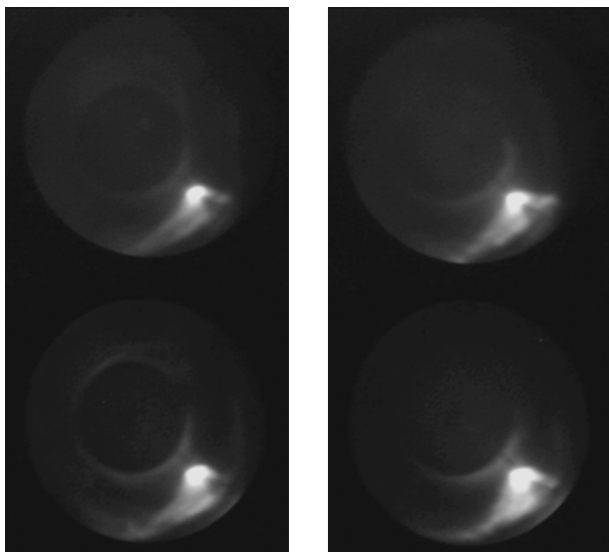


Рис. 4. Калибровка каналов четырехкадровой системы (экспозиция 50 нс).

В максимуме внешнего магнитного поля включалось питание анода п.п.т. и происходил взрыв проволоочки. Регистрация свечения в различные моменты времени осуществлялась с помощью кадров э.о.п.-фотографии (экспозиция 50 нс). Следует отметить, что яркость свечения плазмы возрастает по мере приближения тока анодной батареи к своему амплитудному значению. Чтобы находиться в неизменном диапазоне яркостей, в ряде случаев применялись светофильтры с коэффициентом ослабления 6, а также диафрагмирование (до 22).

Для оценки продольной скорости плазмы применялись затеняющие пластины 5 (рис. 2). Две группы пластинок размером 3×3 мм размещены в области двух образующих катодного цилиндра, которые смещены по азимуту относительно проволоочки на 90° и 270° . Расстояние между пластинками вдоль оси 15 мм, по азимуту – 1 мм. Пластинки, “погруженные” в плазму, не затеняют свечение, что позволяет определить положение границы плазмы. Фотография светящегося зазора с пластинками приведена на рис. 2.

4. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ФОТОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ЭП-15

Для исследования динамики плазмы проволоочки применялись однокадровая и четырехкадровая системы э.о.п.-фотографии [10, 11] с экспозицией 50 нс и задержкой включения э.о.п. относительно начала импульса тока в диапазоне 0–6 мкс. Как и в работах [7, 12] использовалась сборка из двух последовательных э.о.п. ЭП-15 с коэффициен-

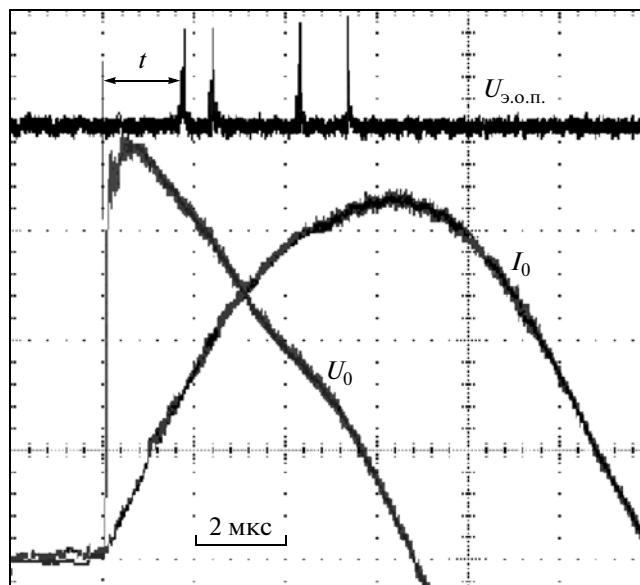


Рис. 5. Осциллограммы тока анодной батареи I_0 (масштаб по вертикали 20 кА/деление), напряжения анодной батареи U_0 (6 кВ/деление) и импульсов запуска э.о.п. $U_{э.о.п.}$ (t_3 – времена их задержки относительно начала импульса тока I_0).

том преобразования $\sim 10^4$ и регистрацией на цифровой фотоаппарат. Однокадровая система обладает более высокими чувствительностью и пространственным разрешением, четырехкадровая же, уступая в чувствительности и пространственном разрешении, позволяла получать достаточно полную картину изменения свечения за один “выстрел”.

Была разработана беспараллаксная система кадрового фотографирования (рис. 3), аналогичная [11], сочетающая в себе достоинство многомодульной системы вместе с относительной компактностью и возможностью получения последовательных кадров. Регистрация изображения с экрана э.о.п. осуществлялась двумя фотоаппаратами Canon EOS 350D, каждый на два э.о.п. Были подобраны четыре э.о.п. с близкими коэффициентами усиления.

Световой поток от исследуемого объекта делится светоделительным кубом 1 (коэффициенты отражения и пропускания 50%) и затем разводится с помощью призм полного внутреннего отражения 2 на идентичные светоделительные каскады. Общий объектив, расположенный между объектом и светоделительным кубом, создает изображение объекта на фотокатодах всех э.о.п. 3. Усиленные изображения с выходных экранов э.о.п. фотографируются двумя фотоаппаратами. Такая конструкция позволяет системе оставаться беспараллаксной, что актуально в экспериментах, где ограничен угол зрения на объект, а э.о.п. расположены

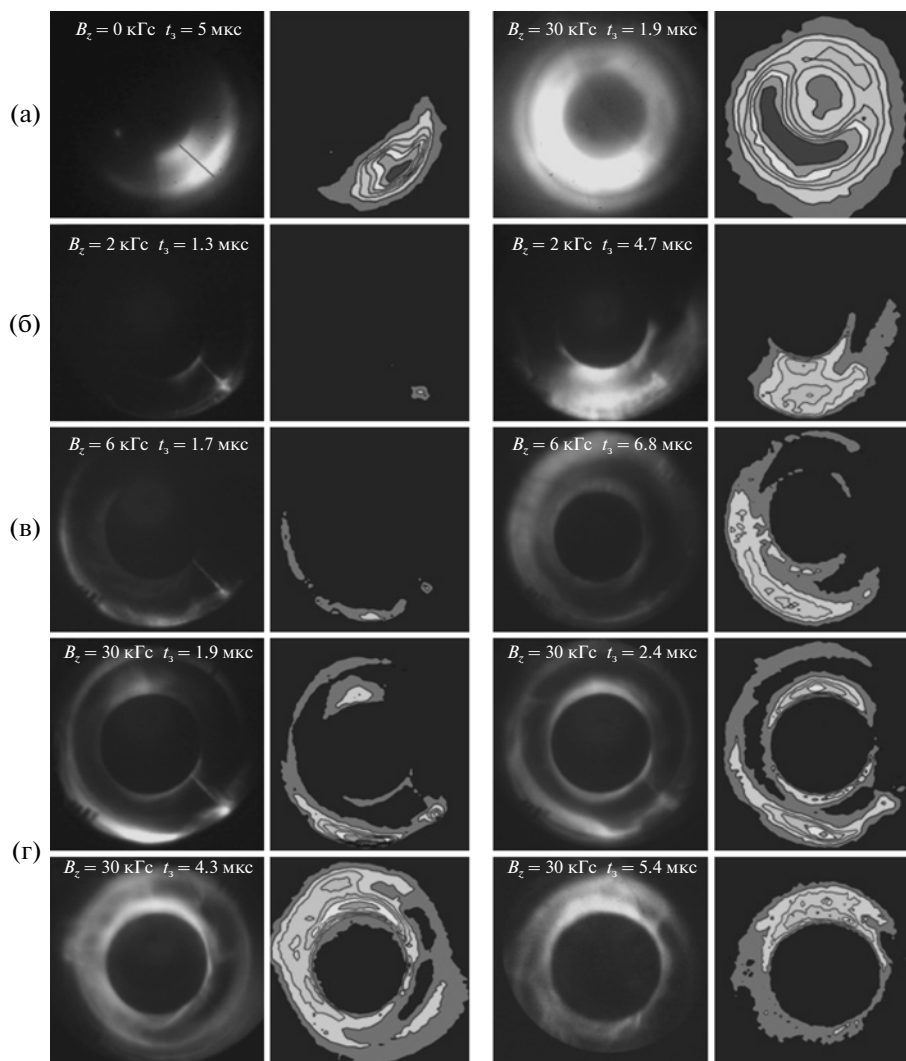


Рис. 6. Эпограммы углеродной проволоочки (а, радиальной чертой отмечено ее начальное положение) и вольфрамовой проволоочки (б–г); B_z — значение внешнего магнитного поля, t_3 — время задержки включения э.о.п. относительно начала импульса тока п.п.т.

на относительно небольшом расстоянии от исследуемого объекта.

Система вместе с регистрирующей фотокамерой смонтирована в помехозащитном светонепроницаемом корпусе. Ввод излучения в корпус прибора оформлен в виде заградительного волновода. Для управления затвором фотокамеры используется электромагнит с диэлектрическим толкателем, проходящим сквозь корпус. На рис. 4 представлены четыре одновременных снимка искрового пробоя для соответствующих каналов четырехкадровой системы.

5. ДИНАМИКА СВЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ПРОВОЛОЧКИ

На рис. 5 представлены типичные осциллограммы при значении внешнего магнитного поля

$B_z = 30$ кГс. Следует отметить, что вид осциллограмм не изменяется с изменением величины магнитного поля.

Типичные серии эпограмм для углеродной и вольфрамовой проволоочек представлены на рис. 6, где каждый кадр представлен в виде реальной фотографии (левая часть) и в виде изолиний интенсивности свечения (правая часть). Рис. 6 иллюстрирует динамику распространения свечения в кольцевом зазоре п.п.т. — “шайбе” для углеродной (рис. 6а) и вольфрамовой проволоочек (рис. 6б–6г) в зависимости от величины B_z и времени задержки t_3 включения э.о.п. относительно начала импульса тока (см. рис. 5).

Из рис. 6а следует, что для углеродной проволоочки в отсутствие магнитного поля скорость разлета свечения (на уровне 0.2–0.3) симметрична

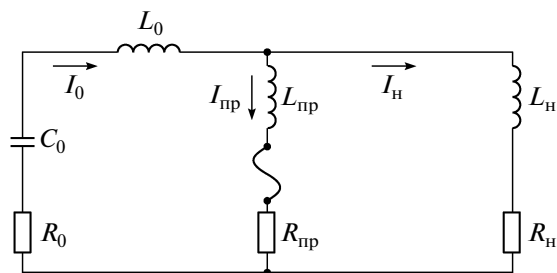


Рис. 7. Схема эксперимента с индуктивной нагрузкой. C_0 , L_0 , R_0 – емкость, индуктивность и сопротивление основного контура; $L_н$ – индуктивность нагрузки; I_0 , $I_н$, $I_{пр} = I_0 - I_н$ – токи основного контура, нагрузки и проволоочки соответственно.

относительно начального положения проволоочки и составляет $\sim 6 \cdot 10^5$ см/с. Включение магнитного поля (30 кГс) приводит к появлению быстрого вращения под действием силы Ампера, и в момент $t_3 = 19$ мкс свечение (на уровне 0.2–0.3) занимает кольцевую область, азимутальная скорость V_θ превышает величину $1.3 \cdot 10^7$ см/с. Более подробно изучалась динамика разлета вольфрамовой проволоочки.

Сравнивая рис. 6б и рис. 6в, 6г, можно сказать, что при малых полях (2 кГс, рис. 6б) азимутальная скорость распространения свечения мала и вновь образующаяся в результате испарения проволоочки плазма накладывается на ранее образованную, создавая ярко выраженный фронт, что позволяет оценить его азимутальную скорость ($V_\theta \approx 5.5$ см/мкс). Видимое свечение вправо от проволоочки может быть объяснено разлетом нейтральных паров и последующей их ионизацией.

Начиная с 6 кГс (рис. 6в) свечение имеет сильно размытый фронт, что может быть следствием двух причин: возрастания азимутальной скорости плазмы и снижения скорости испарения (плазма сносится силой Ампера и не “греет” оставшуюся часть проволоочки). В результате создается впечатление, что свечение “разгорается” одновременно по всему зазору, причем светится в основном приэлектродная часть зазора. Если определять азимутальную скорость V_θ свечения вблизи электродов, то при $B_z = 30$ кГс в момент $t_3 = 1.9$ мкс она равна ≈ 1.2 см/мкс, а к моменту $t_3 = 2.4$ мкс возрастает до ≈ 1.4 см/мкс, что может быть связано с ростом тока во времени. В моменты $t_3 = 4.3$ мкс и 5.4 мкс картинка становится более яркой, особенно разгорается появившееся в момент $t_3 = 1.9$ мкс пятно (под углом $\sim 200^\circ$ относительно первоначального положения проволоочки), что может быть связано с неоднородностью поверхности электродов – электроды покрывались сажей, чтобы не было бликов. Благодаря затеняющим пластинкам удалось определить продольную скорость

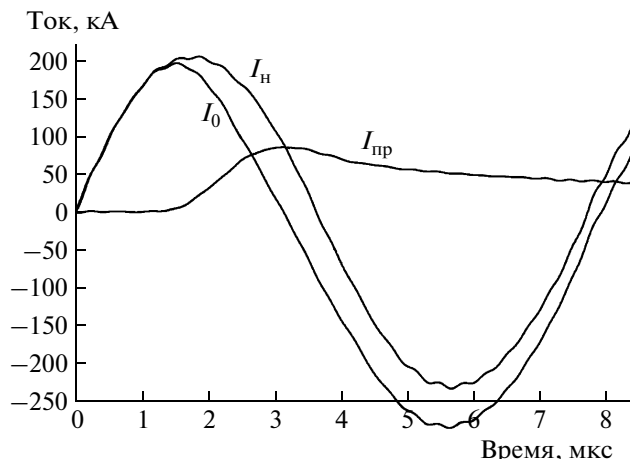


Рис. 8. Осциллограммы токов на РС-20 при использовании низкоиндуктивной нагрузки: емкостного накопителя (I_0), нагрузки ($I_н$) и проволоочки ($I_{пр} = I_0 - I_н$). Вакуумный зазор в цепи индуктивной нагрузки 10 мм, $B_z = 10$ кГс.

плазмы – она не превышает 1 см/мкс для 30 кГс (рис. 6г).

6. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НИЗКОИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Был проведен также эксперимент на установке РС-20 ($C_0 = 0.5$ мФ, $L_0 = 3$ мкГн, $U_0 = 0.7$ МВ, $I_0 = 0.27$ МА, $T/4 = 2$ мкс, $B_z \approx 10$ кГс с вольфрамовой проволочкой длиной ~ 8 см. Была некоторая надежда получить резкий переброс тока п.п.т. в низкоиндуктивную нагрузку $L_н = 0.3$ мкГн $\approx 0.1L_0$ (рис. 7) с вакуумным зазором $d = 1-10$ мм в цепи $L_н$.

Типичные результаты представлены на рис. 8. Ток в нагрузке $L_н$ появляется с задержкой 1.5 мкс относительно появления тока I_0 в основном контуре C_0L_0 (см. рис. 7) и затем медленно нарастает (~ 75 кА за время ~ 1.5 мкс), что не характерно для нормальной работы п.п.т. – нет типичного резкого переброса тока в нагрузку. И хотя результат эксперимента с точки зрения работы п.п.т. отрицательный, он, тем не менее, представляет существенный интерес, так как дает возможность определить динамику сопротивления проволоочки при ее взрыве. Напряжение $U_{пр} = U_н$ в точке ветвления основного тока I_0 на токи проволоочки $I_{пр}$ и нагрузки $I_н$ определяется как

$$U_{пр} = U_н = L_н I_н / dt + R_н I_н = L_{пр} dI_{пр} / dt + R_{пр} I_{пр}. \quad (1)$$

Если пренебречь сопротивлением нагрузки $R_н$ и индуктивностью проволоочки $L_{пр}$, то выражение (1) упрощается и позволяет оценить динамику сопротивления проволоочки:

$$R_{пр} = U_{пр} / I_{пр} = (L_н dI_н / dt) / (I_0 - I_н). \quad (2)$$

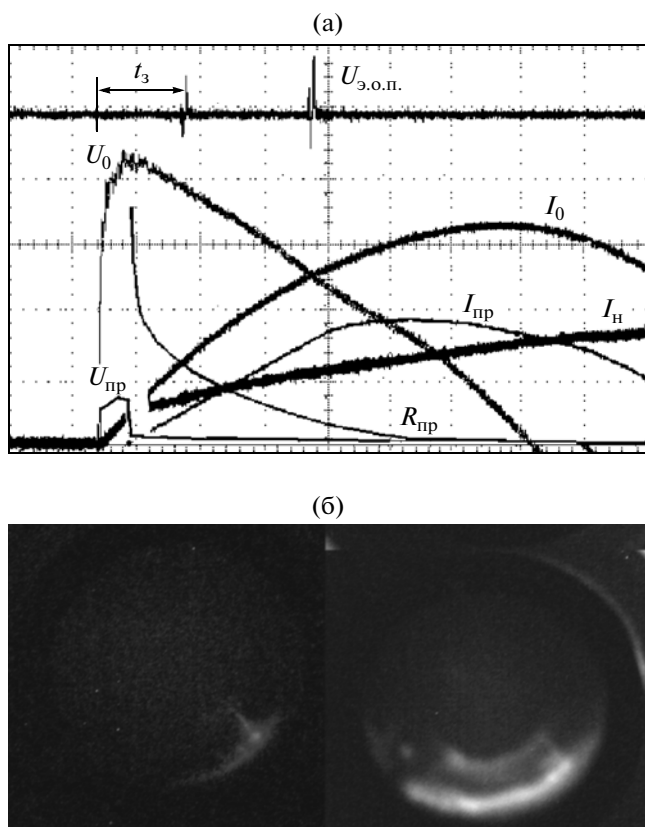


Рис. 9. а – осциллограммы при работе на индуктивную нагрузку $L_n = 0.4$ мкГн при $B_z = 2$ кГс: I_0 – тока батареи, I_n – тока нагрузки, $I_{пр} = I_0 - I_n$ – тока проволоочки, $R_{пр}$ – сопротивления проволоочки, $U_{пр}$ – напряжения на проволоочке, U_0 – напряжения батареи, $U_{э.о.п.}$ – импульсов запуска э.о.п. (масштабы по вертикали: для токов – 20 кА/деление, напряжений – 6 кВ/деление, сопротивления – 0.1 Ом/деление, по горизонтали – 1 мкс/деление); б – свечение зазора через 1.3 и 3.4 мкс после начала импульса тока I_0 .

Подобные эксперименты были выполнены на макете [3]. Динамика сопротивления проволоочки изучалась при разных величинах индуктивности нагрузки и значениях магнитного поля в отсутствие вакуумного зазора. Полученные результаты приведены на рис. 9 и 10.

Видно (рис. 9), что шунтирование проволоочки нагрузкой $L_n = 0.4$ мкГн приводит к задержке момента взрыва проволоочки и появления в ней тока на ~ 0.5 мкс и уменьшению тока проволоочки на $\sim 30\%$. При этом по сравнению с экспериментом без нагрузки (рис. 6б) яркость свечения уменьшается. Снижение индуктивности нагрузки (рис. 10а) приводит к увеличению времени задержки взрыва проволоочки и появления в ней тока до ~ 2 мкс, т.е. чем меньше индуктивность нагрузки, тем больше задержка. Увеличение магнитного поля до 30 кГс (рис. 10б) приводит к большему увеличению задержки взрыва проволоочки (~ 2.2 мкс) и существенному уменьшению тока проволоочки. Пер-

вое обстоятельство связано с понижением напряжения, прикладываемого к проволоочке, второе, по-видимому, с азимутальным сносом образующейся плазмы, что приводит к снижению скорости нагрева проволоочки; при этом резко снижается яркость свечения. Тем не менее, во всех случаях к моменту перехода тока проволоочки через нуль ее сопротивление падает до нуля, и два контура ($C_0 - L_0 - R_{пр} - L_{пр}$ и $L_{пр} - R_{пр} - L_n - R_n$, рис. 7), имеющие проволочку в качестве общего участка цепи, не взаимодействуют между собой: в первом протекает колебательный ток I_0 , в другом – I_n , спадающий с временем L_n/R_n .

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной результат состоит в том, что во всем диапазоне применяемых магнитных полей (вплоть до 30 кГс) удается получить заполнение кольцевого зазора п.п.т. плазмой, образованной при электрическом взрыве углеродной или вольфрамовой проволоочки. Низкая величина продольной скорости плазмы (~ 1 см/мкс) позволяет надеяться на эффективное “размазывание” плазмы по кольцевой “шайбе” до необходимой концентрации за счет резкого роста азимутальной скорости с увеличением тока п.п.т. и внешнего магнитного поля B_z .

Высокая скорость “размазывания” плазмы по азимуту может быть использована в проекте “Байкал” и на установке МОЛ [1] для решения проблемы предимпульса. Действительно, можно подобрать начальные параметры плазмы так, чтобы на стадии предимпульса ее концентрация уменьшалась в результате азимутального выравнивания и к началу основного импульса достигла величины $\sim 10^{13} - 10^{14}$ см $^{-3}$, необходимой для осуществления режима эрозии. Это обеспечит беспрепятственное прохождение предимпульса за счет высокой концентрации и создаст условия для обрыва тока на стадии основного импульса.

Изучение динамики сопротивления проволоочки во внешнем магнитном поле выполнено впервые и представляет несомненный интерес для лайнерных экспериментов [1, 6]. Кроме того, эти результаты показывают, что при работе на низкоиндуктивную нагрузку необходим разделительный разрядник между п.п.т. и нагрузкой.

Продемонстрированная в этих экспериментах возможность заполнения кольцевого зазора п.п.т. плазмой, образованной при электрическом взрыве углеродной или вольфрамовой проволоочки в сильном (до 30 кГс) магнитном поле, а также результаты изучения динамики заполнения зазора являются основанием для продолжения работ с проволоочками или нитями из более легкого материала (углерод, полиэтилен и др.) и применения

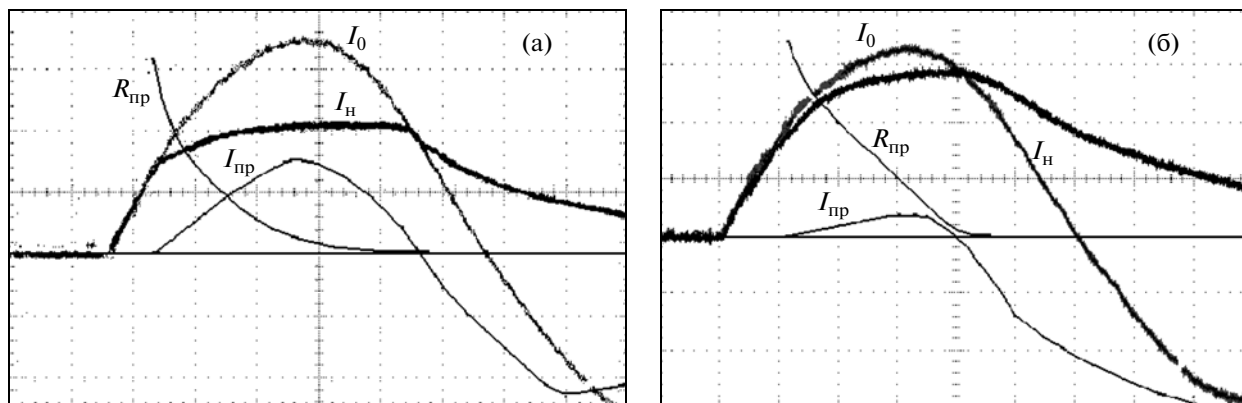


Рис. 10. Осциллограммы при работе на индуктивную нагрузку $L_H = 0.2$ мкГн при $B_z = 6$ кГс (а) и 30 кГс (б): I_0 – тока батареи, I_H – тока нагрузки, $I_{пр} = I_0 - I_H$ – тока проволоки, $R_{пр}$ – сопротивления проволоки. Масштабы по вертикали: для токов – 20 кА/деление, сопротивления – 0.1 Ом/деление, по горизонтали – 2 мкс/деление.

п.п.т. большего диаметра (для получения более низкой концентрации плазмы в его зазоре).

Работа выполнена при поддержке грантов РФ-ФИ 11-02-01008-а и № 12-02-31321-мол_а, грантов Президента РФ МК-2436.2011.2, № СП-748.2013.2 и гранта Минобрнауки РФ № 2012-1.1-12-000-4004-007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов Э.А., Алиханов С.Г., Велихов Е.П. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2001. Вып. 3. С. 3.
2. Бухаров В.Ф., Власов Ю.В., Демидов В.А. // ЖТФ 2001. Т. 71. Вып. 3. С. 57.
3. Dolgachev G.I., Ushakov A.G. // IEEE Trans. Plasma Science. 2006. V. 34. Issue 1. P. 28.
4. Долгачев Г.И., Ушаков А.Г. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 6.
5. Брыксин В.А., Зинченко В.Ф., Иващенко Д.М. и др. // ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2000. Вып. 3–4. С. 82.
6. Spielman R.B., Deeney C., Herbert G. et al // Phys. Plasmas. 1998. V. 5. P. 2105.
7. Долгачев Г.И., Масленников Д.Д., Ушаков А.Г. и др. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 2. С. 193.
8. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1978. С. 368.
9. Баринев Н.У., Будков С.А., Данько С.А. и др. // ПТЭ. 2002. № 2. С. 112.
10. Долгачев Г.И., Масленников Д.Д., Ушаков А.Г. // ПТЭ. 2010. № 6. С. 48.
11. Ананьев С.С. Препринт ИАЭ-6440/7. М., 2008.
12. Ананьев С.С., Казаков Е.Д., Шведов А.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Вып. 2. С. 89.