

УДК 537.563

Влияние режима предионизации на электрофизические характеристики мощных импульсных ксеноновых ламп*

А. Г. Арзев, И. В. Галахов, В. А. Осин,
В. В. Свиридов

Приведены результаты исследований влияния режима предионизации на электрофизические характеристики мощных импульсных ламп с длиной разрядного промежутка 1600 мм и внутренним диаметром колбы 40 мм. На основе измерений тока в контуре и напряжения на лампах были вычислены плотность тока в лампах, энергия, мощность разряда ламп, КПД контура. Проведено сравнение этих характеристик в режимах работы с предионизацией и без предионизации. В пакете программ OrCAD9.2 выполнено моделирование разрядного контура. Сопоставляются расчетные данные и экспериментальные результаты, полученные на прототипе модуля конденсаторной батареи.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается неодимовая лазерная установка УФЛ-2М для экспериментальных исследований в области лазерного термоядерного синтеза [1]. Накачка активных элементов силовых лазерных усилителей будет осуществляться с помощью мощных импульсных ксеноновых ламп. При проектировании лазерных усилителей важной задачей является достижение максимальной эффективности накачки. Одним из методов повышения эффективности накачки, как отмечалось в ряде отечественных и зарубежных исследовательских работ, является использование режима предварительной ионизации (предионизации) ламп [2]. Для обеспечения электрической энергией ламп накачки предназначен ёмкостный накопитель энергии – конденсаторная батарея. Конденсаторная батарея установки УФЛ-2М будет иметь запасенную энергию около 360 МДж и состоять из 432 одинаковых модулей.

По аналогии с накопителями установок NIF (США) [3] и LMJ (Франция) [4] модуль накопителя установки УФЛ-2М будет содержать контур предионизации. Этот контур включается параллельно основному разрядному контуру и срабатывает примерно за 200–300 мкс до срабатывания разрядника основного контура. При этом на импульсные лампы накачки усилителей воздействуют два импульса тока: первый малоэнергетичный импульс тока (импульс предионизации) предназначен для пробоя ламп и создания в них к моменту прихода второго импульса ксеноновой плазмы, а второй (основной) импульс – для непосредственной передачи в лампы заданной электрической энергии. Предионизация ламп увеличивает общую эффективность лазера и стабилизирует пусковые характеристики ламп. Контур предионизации используется также для проверки (тестирования) ламп между срабатываниями.

* Доклад на XI научно-техн. конф. «Молодежь в науке». Саров, 7–9 ноября 2012 г.

Целью данной работы являлось изучение влияния режима предиионизации на электрофизические характеристики мощных импульсных ламп.

Экспериментальный стенд

Исследования проводились в ИЛФИ РЯЦ-ВНИИЭФ на экспериментальном стенде – прототипе модуля конденсаторной батареи создаваемой лазерной установки. В качестве нагрузки модуля использовались импульсные ксеноновые лампы типа ИНП 40/1600.

Электрическая схема высоковольтного испытательного стенда представлена на рис. 1. Она аналогична схеме модуля установки LMJ [4] и представляет собой пять параллельных ламповых контуров, разряжаемых через один управляемый коммутатор и общий контур предиионизации. Каждый ламповый контур содержит конденсатор, формирующую индуктивность, кабельную линию и две последовательно соединенные импульсные ксеноновые лампы. Контур предиионизации содержит конденсатор, резистор и управляемый коммутатор.

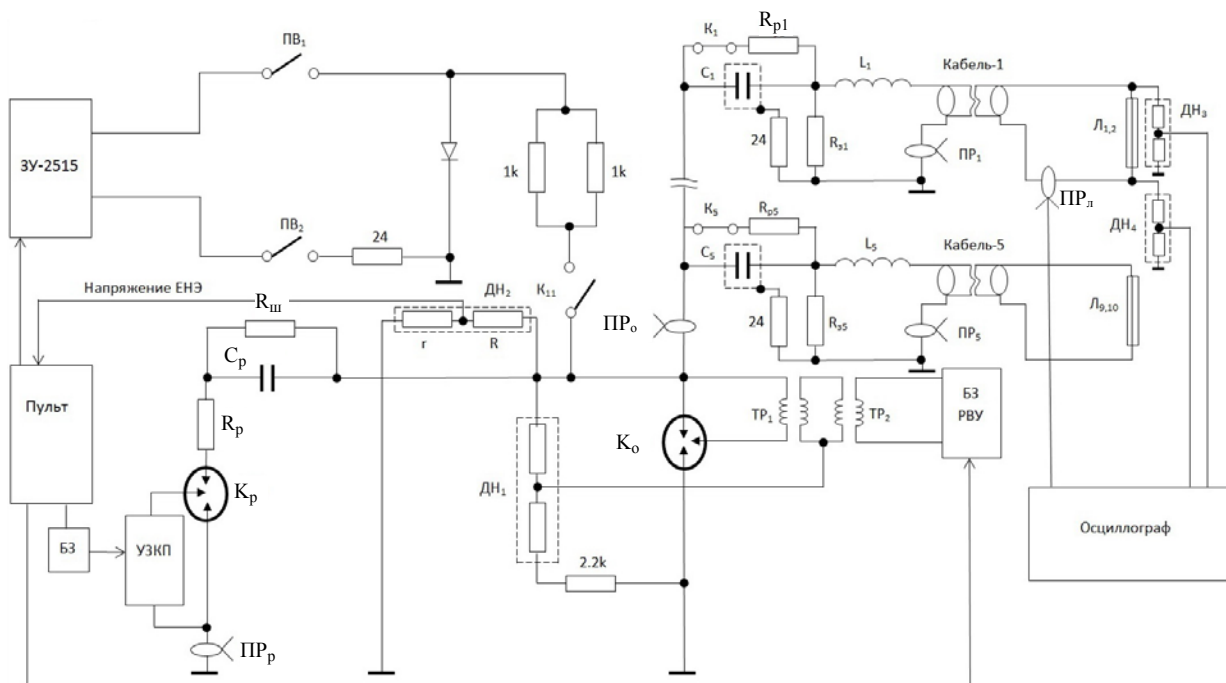


Рис. 1. Принципиальная схема высоковольтного испытательного стенда: $C_1-C_5 = 300$ мкФ – конденсаторы основного контура; $R_{31}-R_{35} = 1$ кОм – зарядные резисторы; $R_{p1} - R_{p5} = 5$ кОм – разрядные резисторы; $L_1-L_5 = 40$ мкГ – формирующие индуктивности; K_1-K_{11} – контакты высоковольтного замыкателя; K_0 – основной коммутатор модуля (управляемый вакуумный разрядник РВУ-43); $C_p = 30$ мкФ – конденсатор предиионизации; K_p – коммутатор предиионизации (управляемый вакуумный разрядник РВУ-43); $R_p = 1,5$ Ом – резистор в цепи предиионизации; $R_{ш} = 6,1$ МОм – шунтирующее сопротивление конденсатора предиионизации; L_1-L_{10} – импульсные лампы ИНП 40/1600; БЗ РВУ – блок запуска основного коммутатора, УЗКП – устройство запуска коммутатора предиионизации; ПР₀, ПР_р, ПР_л, ПР₁-ПР₅ – пояса Роговского; ЗУ-2515 – зарядное устройство; БЗ – блок задержки; ДН₁-ДН₄ – делители напряжения; ПВ₁, ПВ₂ – переключатели высоковольтные, ТР₁, ТР₂ – трансформаторы

Стенд работает следующим образом. Конденсаторы C_1-C_5 основного контура с помощью зарядного устройства ЗУ-2515 заряжаются до необходимого зарядного напряжения. Затем при подаче с пульта управления внешнего сигнала «Пуск» срабатывает коммутатор предионизации K_p , в результате чего происходит заряд конденсатора предионизации и возникают переходные процессы, в результате которых на лампах формируется импульс перенапряжения. В течение первых 10–30 мкс происходит пробой и ионизация ламп цепи L_1-L_{10} . В ламповом контуре и контуре предионизации начинает протекать ток предионизации, представляющий собой ток заряда ёмкости C_p . Параметры импульса тока предионизации определяются в основном параметрами элементов контура L , R_p , C_p и сопротивлением лампы. Длительность импульса тока ~ 100 мкс. Затем через определённое время задержки, которое задается с помощью блоков задержки БЗ, срабатывает коммутатор основного разрядного контура K_o и происходит разряд конденсаторов C_1-C_5 на предварительно ионизированные лампы. Сопротивление $R_{ш}$ обеспечивает разряд ёмкости C_p между включениями. Если режим предионизации не используется, то коммутатор K_p не включается, и конденсатор C_p не заряжается, поэтому пробой ламп происходит при подаче основного импульса.

Экспериментальные исследования работы ламп накачки

Опыты проводились с лампами типа ИНП 40/1600, имеющими длину разрядного промежутка $l = 1600$ мм, внутренний диаметр колбы $d = 40$ мм и давление ксенона в колбе $p = 90$ Торр. Лампы соединялись по последовательно-параллельной схеме в пять параллельных ламповых контуров, по две последовательно соединенные лампы на один контур. Работа осуществлялась при зарядном напряжении 18 кВ в двух режимах – с предионизацией и без предионизации.

В ходе испытаний с помощью пояса Роговского $ПР_{л}$ фирмы «Pearson Electronic» модель 1423 и делителей напряжения ДН₃ и ДН₄ Tektronix P6015A, измеряющих напряжение в ламповой цепи по дифференциальной схеме, измерялись разрядный ток в контуре $I_{л}$ и падение напряжения на лампах $U_{л}$. Регистрация сигналов производилась с помощью цифрового осциллографа с полусой пропускания 100 МГц. На основе этих измерений были вычислены мощность P разряда ламп, энергия, выделившаяся в лампах $E_{л}$, омическое сопротивление ламп $R_{л}$, плотность тока в лампах j , КПД контура η и фактор нагрузки f_x по формулам:

$$P = U_{л}(t)I_{л}(t),$$

$$E_{л} = \int_0^{t_{и}} P(t) dt,$$

$$j = \frac{I_{м}}{S}, R_{л} = \frac{U_{л}}{I_{л}},$$

$$\eta = \frac{E_{л}}{E_3}, f_x = \frac{E_{л}}{E_x},$$

$$E_x = 2 \cdot 10^4 l d \sqrt[4]{LC},$$

где $t_{и}$ – длительность импульса, $I_{м}$ – амплитуда разрядного тока, S – площадь поперечного сечения лампы, E_3 – запасенная энергия, E_x – энергия взрыва лампы.

Типичная осциллограмма импульса разрядного тока и падения напряжения на лампах приведена на рис. 2.

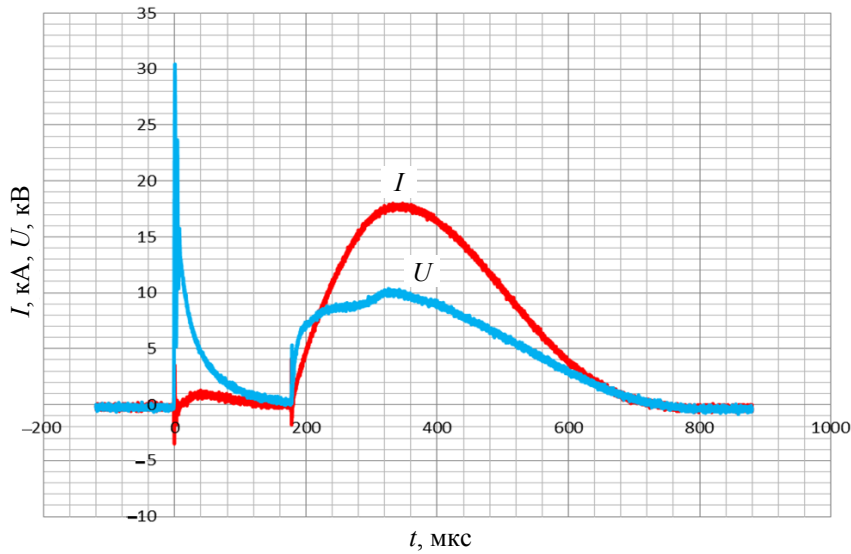


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока и падения напряжения на лампах в одной цепи в режиме с предioniзацией (время задержки 185 мкс)

В ходе исследований сравнивалось время срабатывания ламп (задержки начала сильноточной стадии разряда) при различных значениях задержки основного импульса относительно импульса предioniзации, т. е. задержки запуска основного коммутатора относительно запуска коммутатора предioniзации: 150, 185, 250 и 300 мкс, а также для режима без предioniзации. Время срабатывания ламп определялось как время между моментом появления напряжения на лампах и моментом достижения тока в ламповой цепи уровня 10 % от максимального значения. На рис. 3, 4 выделены начальные участки нарастания тока через лампы для случаев работы без предioniзации и с предioniзацией. В табл. 1 приведены значения времени срабатывания ламп Δt в зависимости от режима работы.

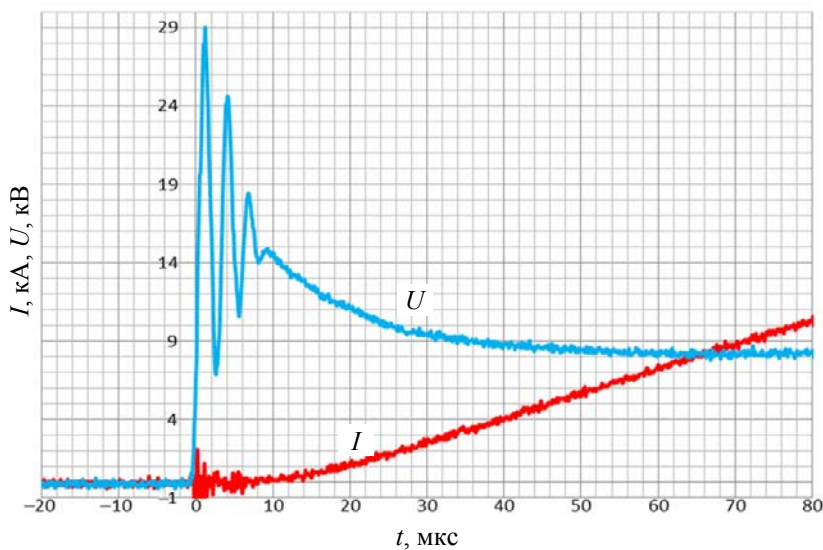


Рис. 3. Начальный участок осциллограмм тока и напряжения в режиме без предioniзации

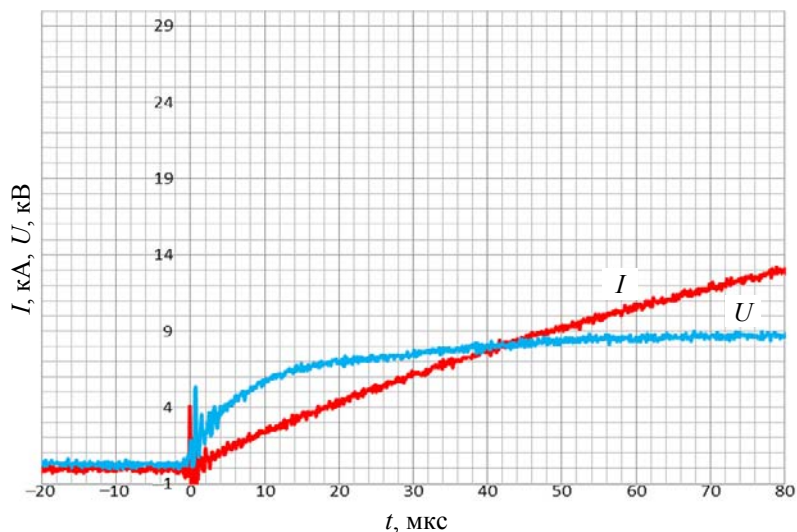


Рис. 4. Начальный участок осциллограмм тока и напряжения в режиме с предионизацией, время задержки 185 мкс

Таблица 1

Время срабатывания ламп Δt

Задержка, мкс	$0,1I_{\max}$, кА	Δt , мкс
150	1,83	7
185	1,76	8
250	1,72	8
300	1,76	9
Без предион.	1,72	24

Из рис. 3 можно сделать вывод, что без предионизации пробой ламп происходит не на фронте импульса напряжения, а через некоторое время после достижения максимума напряжения; при этом ток нарастает достаточно медленно. Если режим предионизации используется (рис. 4), пробой ламп происходит значительно быстрее и на фронте импульса напряжения. Это означает лучшую синхронизацию срабатывания большого количества ламп. Также следует отметить, что время срабатывания ламп при использовании предионизации практически не зависит от времени задержки основного импульса относительно импульса предионизации.

По полученным осциллограммам тока и напряжения на лампах были построены графики изменения сопротивления ламп в ламповой цепи на начальном участке развития разряда для режимов с предионизацией (при различных временах задержки) и без предионизации.

Как видно из графиков (рис. 5), в начале развития разряда сопротивление ламп в режиме без предионизации значительно выше, чем в режиме с предионизацией при рассматриваемых значениях времени задержки. Следовательно, при использовании предионизации диаметр плазменного канала разряда в лампе больше, т. е. происходит лучшее заполнение объема лампы. Приблизительно через 60 мкс после пробоя ламп значения сопротивлений сравниваются и ещё через 30 мкс достигают $\sim 0,5$ Ом, оставаясь на этом уровне и в дальнейшем, что соответствует установившемуся режиму разряда.

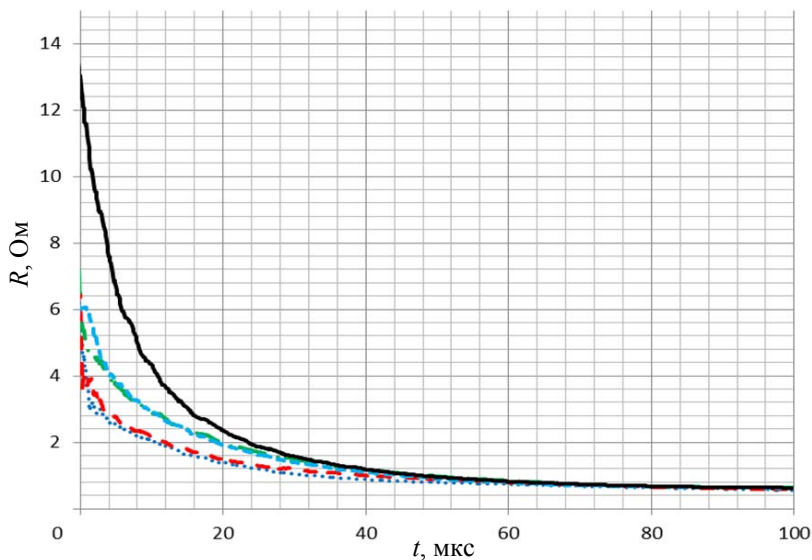


Рис. 5. Графики изменения омического сопротивления ламп в зависимости от времени задержки основного импульса относительно импульса предиионизации: – 150 мкс; - - - 185 мкс; --- – 250 мкс; - - - - - 300 мкс; — – без предиионизации

Графики мощности разряда ламп и энергии, выделившейся в лампах, представлены на рис. 6, 7 (см. также цвет. вкладку).

Основные параметры разряда, полученные на основе экспериментальных данных, представлены в табл. 2.

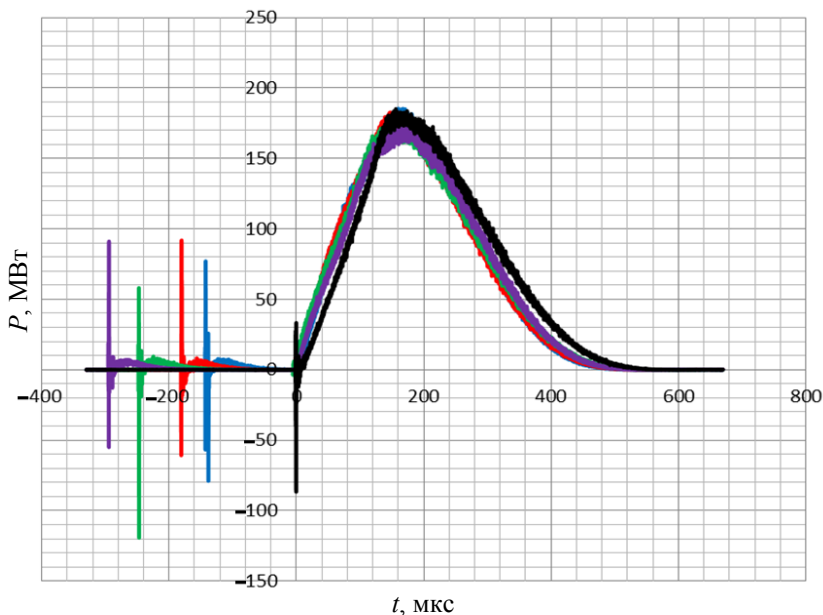


Рис. 6. Мощность разряда ламп в зависимости от времени задержки основного импульса относительно импульса предиионизации: --- – 150 мкс; - - - 185 мкс; --- – 250 мкс; - - - - - 300 мкс; — – без предиионизации

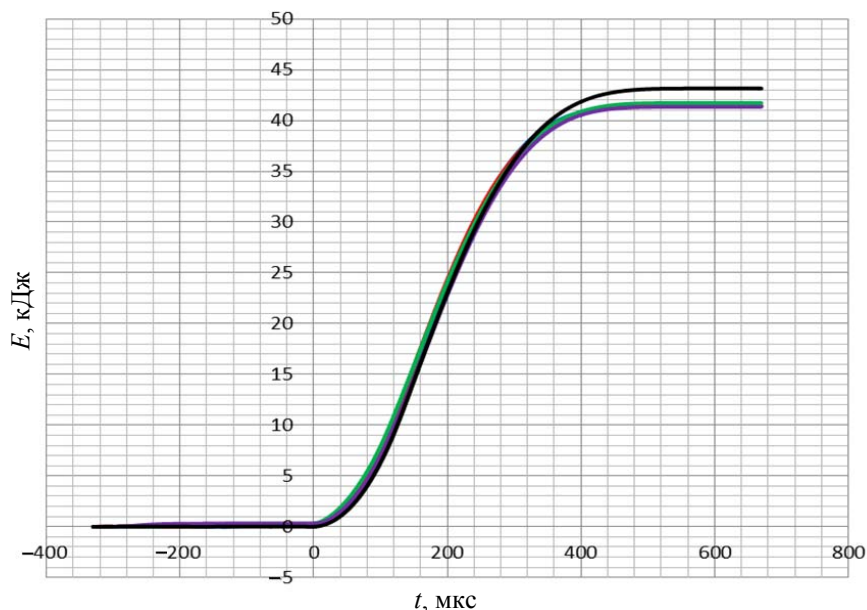


Рис. 7. Зависимость энергии от времени задержки запуска основного импульса относительно импульса предионизации: — 150 мкс; — 185 мкс; — 250 мкс; — 300 мкс; — без предионизации

Таблица 2

Основные параметры разряда

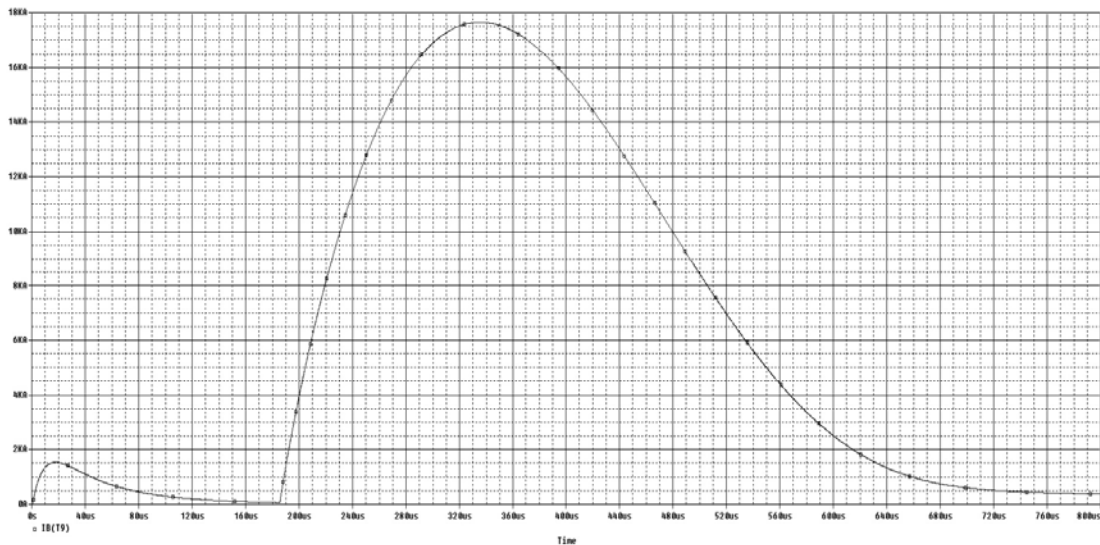
Задержка, мкс	Плотность тока, А/см ²		Амплитуда мощности, МВт		Длительность мощности по уровню 0,1, мкс		Энергия, выделившаяся в лампах, кДж		кпд контура, %		Фактор нагрузки	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.
150	1432	1407	176	182	390	372	41,43	42,21	85,25	86,85	0,16	0,16
185	1392	1404	174	181	390	371	41,40	42,15	85,19	86,73	0,16	0,16
250	1368	1403	166	181	407	372	41,72	42,06	85,84	86,54	0,16	0,16
300	1408	1403	166	181	402	372	41,35	41,99	85,08	86,40	0,16	0,16
Без пред.	1368	1403	174	181	414	371	43,15	43,59	88,79	89,69	0,16	0,17

Из представленных графиков и таблицы видно, что введение режима предионизации не оказывает значительного влияния на мощность основного разряда ламп. Однако при увеличении времени задержки от 150 до 300 мкс максимальная мощность постепенно уменьшается, причем при времени задержки 185 мкс она примерно соответствует максимальной мощности в режиме без предионизации.

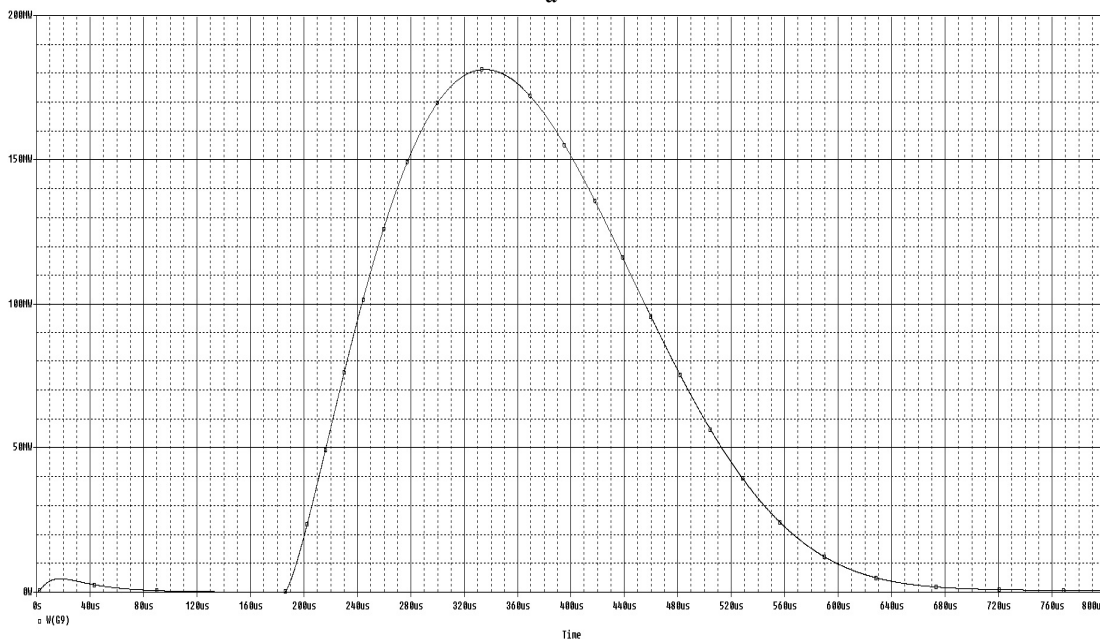
Вложенная в лампы энергия в случае использования предионизации несколько ниже, чем без нее, и практически не зависит от времени задержки основного импульса относительно импульса предионизации. Скорость возрастания энергии практически не зависит от наличия или отсутствия предионизации и времени задержки.

Моделирование разрядного контура

В ходе экспериментальных исследований обрабатывалась также методика расчета разрядного контура в пакете программ OrCAD9.2. Для расчета была разработана модель разрядного контура, включающая нелинейные элементы – импульсные лампы. Характерные графики тока и мощности разряда, полученные при моделировании, приведены на рис. 8. Основные параметры разряда, полученные на основе расчета, представлены в табл. 2.



а



б

Рис. 8. Расчетные ток (а) и мощность (б) разряда (время задержки 185 мкс)

Сравнивая графики тока и мощности разряда, полученные экспериментальным (рис. 2, 6) и расчетным (рис. 8) путем, видим, что они имеют практически идентичную форму, соответствующую критическому режиму разряда.

Из табл. 2 видно, что расчетная модель в целом довольно точно описывает процессы, происходящие в ламповом контуре (расхождение характеристик не превышает 5 %), т. е. данную методику можно применять в дальнейшем для расчета характеристик разрядного контура накопителя установки УФЛ-2М.

Выводы

1. На экспериментальном стенде исследованы электрофизические характеристики импульсных ксеноновых ламп типа ИНП 40/1600. Рассмотрены два режима работы – без предиионизации и с предиионизацией при различных значениях времени задержки основного импульса относительно импульса предиионизации. Показано, что электрофизические характеристики, полученные в эксперименте, хорошо совпадают с расчетными, что свидетельствует о правильности выбранной методики расчета.

2. Осциллограммы импульсных токов и напряжений показывают, что при работе в режиме без предиионизации развитие разряда происходит с существенной задержкой (~25 мкс), тогда как для предварительно ионизированных ламп время срабатывания уменьшается приблизительно в три раза и фактически не зависит от времени задержки основного импульса относительно импульса предиионизации. Пробой ламп в момент прихода импульса основного разряда при использовании предиионизации наступает на фронте импульса напряжения и при значительно меньшем значении напряжения. Таким образом, введение режима предиионизации приведет к уменьшению разброса времени срабатывания ламп в различных ламповых цепях.

3. Графики изменения омического сопротивления ламп показывают, что при использовании предиионизации сопротивление на начальной стадии (примерно 60 мкс) развития разряда значительно ниже, чем без нее, что свидетельствует о лучшем заполнении объема лампы плазмой.

4. Сравнения мощности и энергии в ламповой цепи для двух режимов показывают, что введение режима предиионизации не оказывает значительного влияния на эти параметры. Наблюдается некоторое снижение амплитуды и увеличение длительности импульса мощности при увеличении времени задержки основного импульса относительно импульса предиионизации.

5. На основании проведенных экспериментов и расчетов можно сделать вывод, что время задержки основного импульса относительно импульса предиионизации слабо влияет на рассмотренные электрофизические характеристики. Тем не менее, ожидается, что его влияние на оптические характеристики ламп будет более выраженным, что позволит подобрать оптимальное время задержки основного импульса относительно импульса предиионизации.

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Бельков С. А., Бондаренко С. В. Концепция построения лазерной установки «УФЛ-2М» // XXXIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2012.
2. Hammon G. III, Newton M. A. NIF Amplifier Power Conditioning System (PCS) Design Basis Document. LLNL UCRL-MA-150291.

3. LLNL ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility. Virginia: Springfield, 1997. Vol. 7, N 3.
4. Andre M. L. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 1997. Vol. 3047. P. 38.

Influence of Preionization Mode on Electrophysical Characteristics of High-Power Flashlamps

A. G. Arzev, I. V. Galakhov, V. A. Osin, V. V. Sviridov

In this article we present the results of research of preionization mode influence on electrophysical characteristics of high-powered flashlamps. The flashlamp arc length is 1600 mm and the bore diameter is 40 mm. The values of current and voltage in the flashlamp circuit were measured. On the basis of these measurements, flashlamp current densities, power, energy and circuit efficiency were computed. Comparison of these parameters in operating modes with preionization and without preionization was made. The circuit model was developed with the OrCAD9.2 software. Comparison of circuit simulation data with experimental results which were obtained at the capacitor bank prototype was carried out.