

УДК 621

МОЩНЫЙ ГЕРЦОВЫЙ ИСТОЧНИК МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

*В. А. Веретенников, В. А. Грибков, А. В. Дубровский, А. И. Исаков,
О. Н. Крохин, В. Я. Никулин, П. В. Силин*

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия

П. Ли, С. Ли, А. Сербан, Кс. Фенг, Г. Кс. Цанг

Няньянгский Технологический университет, Сингапур

В. Д. Бочков

Научно-производственный центр СПАРК, Рязань, Россия

Л. Т. Вехорева

С.-Петербургский Технологический университет, С.-Петербург, Россия

Е. П. Боголюбов, Ю. П. Иванов

Всероссийский НИИ автоматики, Москва, Россия

Разработан и испытан источник мягкого рентгеновского излучения (9–14 Å) на основе плазменного фокуса. В качестве накопителей энергии в установке использованы четыре высоковольтных импульсных конденсатора типа КМК-30-8 с суммарной энергоемкостью до 15 кДж. Коммутаторами служили четыре тиратрона с холодным катодом “Эволюта-1”, рассчитанных на коммутацию тока до 150 кА каждый. При достигнутых разрядном токе установки в 280 кА и частоте 3,5 Гц ее ресурс оценивается как 10^7 включений (около года непрерывной работы). Собственно источником мягкого рентгеновского излучения служила миниатюрная камера плазменного фокуса, заполняемая неоном. Рентгеновское излучение каналировалось вдоль оси камеры через отверстие во внутреннем электроде (аноде). Найден режим со средним выходом более 100 Дж за разряд. Произведен демонстрационный эксперимент по облучению рентгенорезиста.

Как известно, прогресс в ряде областей науки и техники, связанных с изучением и изготовлением наноструктур (укажем здесь для примера соответственно исследования “мокрых” биологических тканей и наноэлектронику), основывается на работах по освоению источников и сопутствующей техники формирования изображений в области длин волн порядка 0,1 мкм и короче. Очевидно, что здесь прежде всего необходимы источники излучения с длиной волны, короче вышеуказанного масштаба. Для эффективного использования этих источников в нанофизике они должны удовлетворять целому ряду специфических требований, важнейшими из которых являются максимально достижимая монохроматичность спектра и минимальная расходимость пучка их излучения. Идеальным решением данного вопроса явился бы рентгеновский лазер. Однако работы по нему находятся в зачаточной стадии, и рассчитывать на быстрый прогресс в этой области — так, чтобы иметь технологичную и коммерчески приемлемую установку — пока не приходится. К счастью, современная наука обладает мощными источниками мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с параметрами, вполне удовлетворяющими предъявляемым требованиям в данных областях науки и техники. Нерешенными проблемами здесь являются воспроизводимость импульсов МРИ, высокая частота срабатывания установок и их ресурс.

Исследования в этой области проводятся по двум основным направлениям — использование контактного и применение проекционного видов рентгенотехники.

В первом случае оптимальной является весьма короткая длина волны излучения источника (обычно порядка 10 Å), которая необходима, чтобы избежать

влияния дифракции и в то же время не уменьшить зазор между объектом и детектором (резистом) до нетехнологичных величин (обычно несколько микрон). Во втором случае используется более длинноволновое излучение (порядка 100 \AA), при котором еще возможно применение рентгеновской оптики на основе многослойных отражающих зеркал и фазовых зонных пластинок. После пятнадцатилетнего периода работ в этой области только три типа источников признаны перспективными для вышеуказанных применений — источники на основе синхротронного излучения релятивистских электронов, на основе лазерной плазмы и пинчевые источники. Однако первый тип требует наличия относительно дорогостоящих ускорителей и, в особенности, степперов (в силу необходимости вертикального расположения последних), а второй тип обладает низкой эффективностью и рядом технологических недостатков. В связи с этим в последних исследованиях в этой области [1, 2] все большее внимание начинает уделяться точечным источникам мягкого квазимонохроматического излучения на основе зет-пинча. В силу конструктивных особенностей наилучшей здесь является установка типа "плазменный фокус (ПФ)" [1—4]. В свете вышеуказанных причин мы сосредоточили свое внимание на создании установки МР-излучения именно на основе пинчевой установки данного типа (ПФ).

Нами разработан и испытан источник МРИ ($9\text{--}14 \text{ \AA}$) на основе плазменного фокуса. В качестве основных емкостных накопителей энергии в установке использованы четыре высоковольтных импульсных конденсатора типа КМК-30-8 с суммарной энергоемкостью до 15 кДж . Коммутаторами служили четыре тиратрона с холодным катодом "Эволюта-1", рассчитанных на коммутацию тока до 150 кА каждый. Одной из главных задач, решавшихся при конструировании установки, было обеспечение ее высокого ресурса. Решение этой задачи основано на выборе наиболее совершенных элементов и систем и снижении их эксплуатационных параметров по сравнению с максимально допустимыми. При достигнутых разрядном токе установки в 280 кА и частоте $3,5 \text{ Гц}$ ее ресурс оценивается как 10^7 включений (около года непрерывной работы). Собственно источником мягкого рентгеновского излучения служила миниатюрная камера плазменного фокуса, заполняемая неоном под давлением $10\text{--}25 \text{ мбар}$. Рентгеновское излучение плазменного фокуса каналировалось вдоль оси камеры через отверстие во внутреннем электроде (аноде). Излучение регистрировалось с помощью PIN-диодов. На четырехконденсаторной установке произведено около 20 тыс. разрядов. Производились поиск оптимального режима работы установки и оптимизация формы и размеров электродов камеры плазменного фокуса по параметру абсолютного выхода рентгеновского излучения. Найден режим со средним выходом более 100 Дж за разряд. Произведен демонстрационный эксперимент по облучению рентгенорезиста с характерным размером элемента около 5 мкм .

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ

Установка состоит из следующих конструктивных элементов и систем:

- емкостного накопителя из четырех конденсаторов;
- зарядного устройства;
- четырёх псевдоразрядников, коммутирующих разряд конденсаторов на разрядную камеру;
- четырёх систем прогрева водородных генераторов коммутаторов;
- четырёхканальной системы поджига коммутаторов на основе разрядника;
- импульсного генератора, запускающего систему поджига псевдоразрядников;
- высоковольтных шин и коллектора;
- разрядной камеры типа "плазменный фокус";
- системы вакуумной откачки;
- системы регулируемого по конечному давлению заполнения разрядной камеры рабочим газом;
- канала вывода рентгеновского излучения, позволяющего производить исследование параметров излучения и облучение рентгеновских фоторезистов;
- разрядной системы и системы безопасности;

совокупности диагностических методов и регистрирующей аппаратуры.

Схематическое изображение установки представлено на рис. 1. Четыре высоковольтных конденсатора размещены по углам прямоугольника со сторонами 1050x990 мм². На каждом конденсаторе установлен коммутатор. Вся конструкция собрана из дюралюминиевых стержней и пластин. В качестве шин, подводящих высокое напряжение с минусовых клемм коммутаторов и с плюсовых выводов конденсаторов к токовому коллектору, расположенному в центре конструкции, использованы две дюралюминиевые пластины толщиной 5 мм, разделенные 6-миллиметровым полиэтиленовым листом. В установке использована зарядная схема с заземленным плюсом. В токовый коллектор, выполненный из латуни с применением капролона в качестве изолятора, вставляется камера плазменного фокуса (ПФ) таким образом, что вакуумная система подсоединяется к ней снизу, а канал вывода рентгеновского излучения направлен вверх, где смонтирована камера для облучения рентгенорезиста с рентгеновскими дозиметрами, имеющая самостоятельную вакуумную откачку. В токовом коллекторе использованы зажимы для камеры ПФ цангового типа. Установка снабжена разрядными штангами с разрядными водяными сопротивлениями.

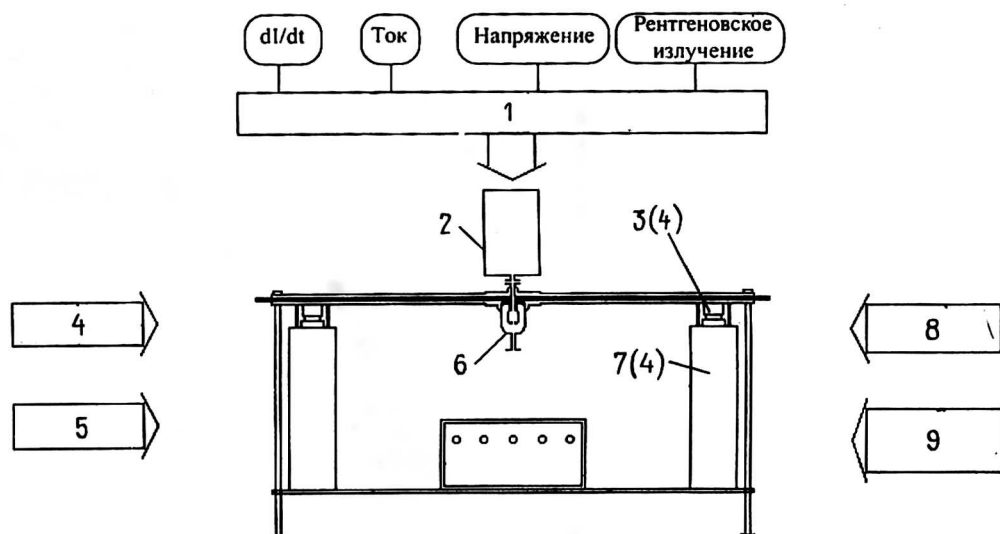


Рис. 1. Схема установки: 1 — измерительная система; 2 — камера для литографии; 3 — РНД (4); 4 — зарядное устройство; 5 — система запуска; 6 — камера ПФ; 7 — конденсаторы (4); 8 — вакуумная система; 9 — генератор водорода; система подогрева

На рис. 2 показана электрическая схема установки, на рис. 3 — принципиальная схема поджигающей системы.

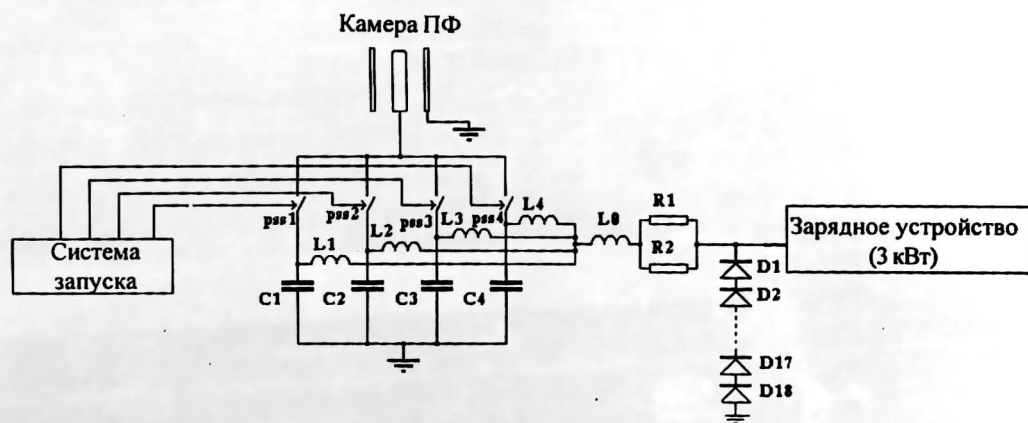


Рис. 2. Электрическая схема установки

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В качестве накопителей энергии использовались разработанные Санкт-Петербургским Государственным техническим университетом специально для данной установки высоковольтные импульсные конденсаторы, получившие название КМК-30-8 (конденсаторы малоиндуктивные касторовые на напряжение 30 кВ, емкостью 8 мкФ, с расчетной индуктивностью 10 нГн).

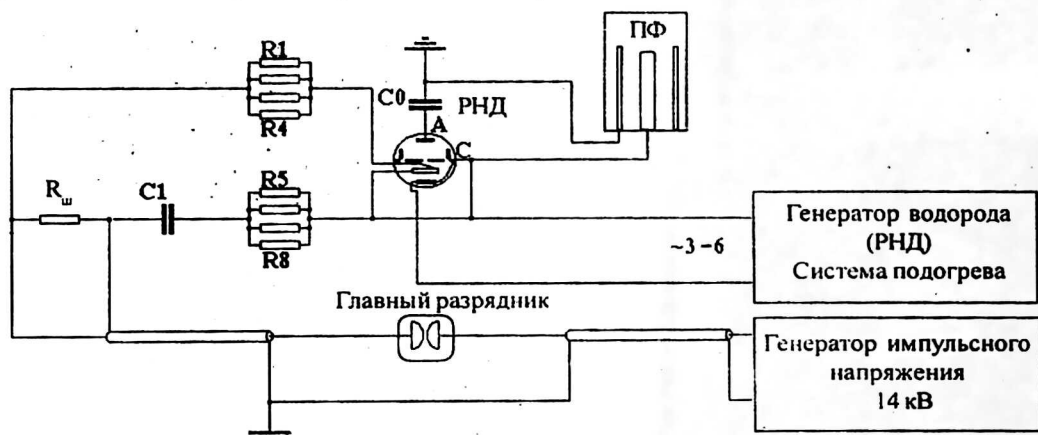


Рис. 3. Принципиальная схема системы поджига

Специальная конструкция выводов конденсатора не только обеспечивает малую индуктивность самого конденсатора, но и предусматривает малоиндуктивное подсоединение коммутатора. Последнее обстоятельство достигнуто благодаря тому, что конструктивные элементы стыковки (конденсатор плюс коммутатор) были взаимосогласованы разработчиками того и другого элементов при проектировании установки. Система выводов и сборных шин конденсатора обладает повышенной тепловой и динамической устойчивостью, что позволило при разряде на малоиндуктивную нагрузку достигнуть номинального значения тока до 350 кА (на одном конденсаторе). Применение полимерных конденсаторных пленок и конденсаторных бумаг с повышенной электрической прочностью позволило существенно уменьшить толщину диэлектрика секции и ослабить краевой эффект фольги. Масса конденсатора 70 кг; габаритные размеры 240x270x680 мм³.

Благодаря использованию оптимальной структуры комбинированной изоляции расчетный ресурс конденсатора при номинальном напряжении составляет 10^6 разрядов. Конденсатор предназначен для работы при аperiodическом разряде с частотой следования импульсов до 1 Гц. При снижении рабочего напряжения допустимо увеличение частоты, а ресурс конденсатора увеличивается в степенной $(U/U_0)^6$ зависимости. Так, при напряжении, составляющем половину номинального, т. е. при 15 кВ, ожидаемое увеличение ресурса составляет два порядка по величине. Иначе говоря, ресурс конденсатора при $U = U_{\text{ном}}/2$ должен быть порядка 10^8 , что должно составить, при непрерывной его работе с частотой 3 Гц, промежуток времени, равный 3 годам. По понятным причинам, экспериментальная проверка этой цифры представляется затруднительной.

Следует, однако, заметить, что условие аperiodичности разряда оказывается существенным при оценке ресурса конденсатора. В описываемой установке разряд имеет вид затухающих колебаний (не является аperiodическим). В этом случае ресурс конденсатора определяется неким эффективным напряжением, складывающимся из величины зарядного напряжения и амплитуды второй полу волны напряжения разряда (максимального напряжения переполюсовки). Рабочее зарядное напряжение в нашем эксперименте составляло 12 кВ. Осциллограмма напряжения показала, что величина напряжения переполюсовки составляет 70 % от зарядного, или 8 кВ. Таким образом, оценка ресурса конденсатора для данных

условий должна проводиться по величине эффективного напряжения $U_{эф} = 20$ кВ. Ресурс нашего высоковольтного конденсатора КМК-30-8 по такой оценке составил величину чуть более 10^7 разрядов, т. е. около года непрерывной работы.

КОММУТАТОР

Для коммутации импульсной энергии в нагрузку в установке применен тиратрон с холодным катодом, иначе называемый псевдоискровым разрядником или разрядником низкого давления (РНД). Использован РНД типа "Эволюта-1" [5—7] с параметрами: максимальное анодное напряжение 25 кВ; максимальная амплитуда тока анода 150 кА; максимальная частота следования разрядов 50 Гц; минимальная наработка (ресурс) по коммутируемому за время работы суммарному заряду более $5 \cdot 10^5$ Кл.

На рис. 4 показаны внешний вид и конструкция псевдоискрового разрядника "Эволюта-1". РНД наполняются газом при давлении 0,01—0,8 мм рт. ст. Наиболее удобным в эксплуатации газом является водород, который обеспечивает высокие частотные свойства прибора, а существующие технические решения позволяют иметь его запас в специальных управляемых резервуарах (так называемых генераторах водорода) и пополнять естественную убыль в процессе работы. Наличие газа при низком давлении (левая ветвь кривой Пашена) позволяет вынести устройство поджига в отдельную камеру и тем самым сделать его практически независимым от режима работы основного разрядного промежутка, что не удастся сделать в других типах разрядников. При этом поджиг в РНД осуществляется за счет инжекции заряженных частиц из плазмы наполняющего (балластного) газа либо за счет поджига вспомогательного разряда поджигающим устройством и переноса заряженных частиц посредством плазмы балластного газа. Инициирование и развитие разряда, а также достижение фазы проводимости при токах приблизительно до нескольких килоампер и длительностях импульса до 1 мкс в РНД происходят в среде наполняющего газа, а при больших токах и длительностях импульсов — также, как в вакуумных, в парах материала от твердого металлического катода. Балластный объем сообщается с межэлектродным промежутком через четыре отверстия диаметром 3—4 мм, которые расположены на окружности $\varnothing 40$ мм.

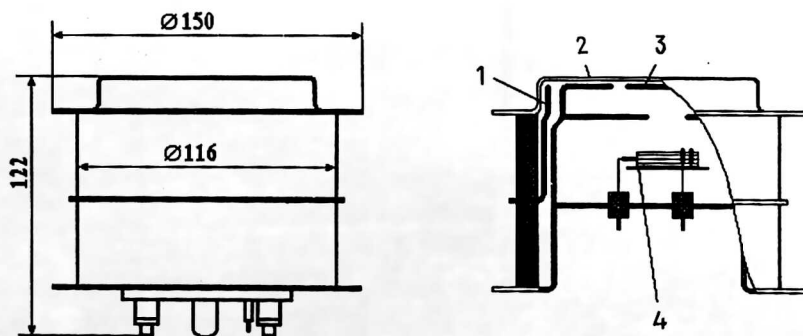


Рис. 4. Схема разрядника низкого давления "Эволюта-1":
1 — экран; 2 — анод; 3 — катод; 4 — поджигатель

Исследования РНД показали, что на долговечность разрядника огромное влияние оказывает быстрое снижение его электропрочности из-за появления на боковой поверхности катода диэлектрических пленок из материала керамики. Полностью устранить это влияние позволили особая, т. н. реэнтратная компоновка основных электродов, применение системы экранов и специальное диэлектрическое покрытие

внутренней поверхности керамического изолятора для защиты его от воздействия дугового разряда.

Особую роль в увеличении ресурсных показателей РНД играет специальная конструкция катода. При ее разработке учитывались следующие соображения. Как известно, для коммутации заданного количества электричества в любом случае необходимо затратить определенное количество энергии на испарение и ионизацию определенной массы вещества электродов, для известных материалов различающаяся ненамного. Использование более тугоплавких материалов ведет к увеличению затраченной энергии (теплота сублимации, например, вольфрама 203 ккал/моль, а меди — 80 ккал/моль). Кроме того, при больших крутизнах и амплитудах импульса тока усиливается бризантное действие разряда, приводящее к пылевой эрозии вольфрамовых или молибденовых электродов. Использование относительно легкоплавких, пластичных материалов, таких как медь, никель, нержавеющая сталь и другие, не приводит к появлению посторонних свободных частиц. Однако на легкоплавком материале, например на меди, за счет ее высокой теплопроводности катодное пятно плавит большую, чем требуется для создания необходимой плотности пара, массу расплавленного металла, который разбрызгивается и переносится в электрическом поле электродов с катода на анод, приводя к большим (в 10—30 раз) значениям расходуемой на коммутацию единицы заряда массы вещества электродов по сравнению с тугоплавкими. В некоторых режимах работы это приводит как бы к инверсному копированию конусообразной впадины на катоде горкой на аноде. Причем такое разрушение катода не ведет к снижению электропрочности прибора до того момента, пока в катоде не образуется отверстие большего диаметра в удаленной от анода поверхности.

Необходимо отметить, что разряд в начале работы прибора, равномерно распределяясь по отверстиям, после наработки $\sim 10^2$ — 10^3 Кл начинает привязываться к одному из отверстий, поэтому увеличение рабочей поверхности электродов практически не приводит к увеличению срока службы разрядника, так как разрушению подвергается только определенный локальный участок, в то время как остальные участки поверхности в течение всего срока службы оказываются почти незадействованными. Использование тугоплавкого материала электродов в расчете на то, что он будет лучше противостоять тепловому воздействию дуги, не только не приводит к желаемому результату, а, напротив, способствует тому, что в процессе развития разряда на фронте импульса тока появляются срывы, колебания, и в разряде устанавливается более высокое падение напряжения, чем при использовании легкоплавкого металла. Это усиливает тепловое воздействие разряда и приводят к изменению характера разрушения электрода: помимо испарения металла происходят разбрызгивание расплавленных жидких капель, растрескивание и сколы твердых частиц. Использование композиционных материалов, таких как W—Cu, изготовленных методом порошковой металлургии, более предпочтительно, чем одного только тугоплавкого или одного легкоплавкого материала. В то же время, характер эрозии композиционного материала остается таким же, как и у последних — та же конусообразная выработка отверстия в катоде.

Уменьшить эрозию катода можно путем увеличения подвижности канала разряда за счет изменения структуры материала или конструкции катода так, чтобы после испарения части катодного материала затруднилось бы горение разряда в этом месте, а катодное пятно передвинулось бы на соседний участок. Это было достигнуто за счет “сэндвичевой” структуры катода, в которой использованы слои материалов с различными значениями теплоты сублимации. Верхний слой, обращенный к аноду, обладает минимальным ее значением, а расположенные глубже слои — большим значением. Весьма важно, что слои металлов, имеющих различный коэффициент расширения, после пакетирования, например с помощью пайки, находятся в состоянии механического напряжения, что существенно увеличивает их прочность и твердость, а также изменяет теплофизические характеристики.

Работа такого катода происходит следующим образом. В начальный период, как и обычно, под действием разряда происходит локальное разрушение отдельного участка рабочей поверхности по окружности отверстия катода. Легкоплавкий материал испаряется с этого участка с последующим высвобождением лежащего под ним слоя более тугоплавкого металла, что приводит к ухудшению условий испарения. В результате возникает дефицит носителей заряда, повышается падение напряжения в разряде. Поскольку разряду энергетически выгоднее гореть на легкоплавком материале, создается ситуация, при которой разрядный канал перемещается на соседний участок рабочей поверхности, где слой легкоплавкого материала еще не выработан. С течением времени таким образом вырабатывается почти весь поверхностный слой из легкоплавкого материала. После этого наступает очередь работать более глубинному второму слою. В принципе, при наличии нескольких слоев различных материалов этот процесс повторяется, приводя к разрушению все более глубинных слоев.

Выполнение рабочей части электродов в виде многослойной структуры позволяет получить еще один положительный эффект — устранить деформацию катода, которая проявляется в виде волн с чередующимися гребнями и впадинами. Волны возникают при работе РНД в частотном режиме (впервые этот эффект был замечен при коммутируемой энергии 1—3 кДж, токах 10—50 кА, частоте 15 Гц) за счет термических напряжений и ударных волн, возникающих при прохождении мощных импульсов тока. Наиболее неприятным следствием этого является поджиг РНД, так как под действием разряда металл становится пластичным. Он как бы “течет” и замазывает отверстия. Это явление приводит к изменению временных параметров и даже к полной потере управляемости прибором. Экспериментально установлено, что изготовление рабочего слоя катода в виде “сэндвича” существенно уменьшает “волновую” деформацию поверхности и изменение диаметра отверстий в катоде.

Таким образом, при работе разрядника “сэндвичевая” структура автоматически регулирует более равномерную, полную и последовательную выработку катода, в итоге обеспечивая высокую его долговечность. Выполнение рабочей поверхности катода из легкоплавкого материала создает условия для снижения энергетических затрат на поддержание горения дугового разряда и обеспечивает гладкую, без обрывов и резких колебаний форму импульса тока.

В узле поджига использован цилиндрической формы поджигатель из поликристаллического карбида-нитрида бора, смонтированный на керамической пластине. Одним из электродов поджигателя служит штырь в одном из торцев цилиндра; боковую поверхность цилиндра в средней его части огибает второй электрод, выполненный в виде спирали из медной проволоки. Поджигатель за счет поликристаллической структуры имеет шероховатую поверхность с множеством выступов, которые образуют с витками медной проволоки большое количество точек контакта, каждый со своим переходным сопротивлением. При подаче напряжения поджига в одной из точек контакта, там, где условия для выделения энергии оптимальны, возникает искра, которая при достаточной энергии поджига вызывает развитие разряда, перекрывающего газовый промежуток над поверхностью поджигателя между электродами. Из плазмы этого разряда поем, образованным между катодом и поджигателем, через катодные отверстия электроны инжектируются в промежуток между катодом и анодом РНД, поджигая основной разряд.

В процессе работы искра возникает в различных точках поджигателя. При этом материал поджигателя и медной проволоки постепенно испаряется. Срок службы такой конструкции превышает $5 \cdot 10^6$ импульсов при параметрах поджига: $U_{tr} = 2$ кВ; $I_{tr} = 100$ А; $C_{tr} = 0,2$ мкФ. Во время такого (рекомендуемого разрабочником) режима работы поджигающей системы на поджигателе выделяется около 0,4 Дж энергии. В описываемой установке в целях достижения высокой синхронности срабатывания нескольких разрядников (см. ниже) использовались

поджигающие импульсы наносекундной длительности с энергией на два порядка величины ниже рекомендованной. При этом каких-либо отклонений от обычного режима работы РНД замечено не было. Это обстоятельство должно увеличить ожидаемый ресурс поджигающей системы РНД. Сопротивление поджигателя $R_{гг}$ обычно бывает в пределах от 10 Ом до нескольких килоом.

На генератор водорода (на рис. 4 не показан) подается переменное напряжение 3—6 В, причем конкретная величина этого напряжения тщательно подбирается для каждого РНД в процессе их “тренировочной” серии пусков и должна контролироваться в процессе его последующей эксплуатации, поскольку она определяет рабочее давление газа в межэлектродном промежутке и, следовательно, электрическую прочность разрядника. Практика показала, что, стартовав с различных для каждого из четырех РНД напряжений, примерно к сотому пуску все четыре псевдоразрядника начали весьма регулярно срабатывать при едином напряжении, равном 5 В. Один из выводов водородного генератора соединен с катодом РНД. В описываемой установке это обстоятельство потребовало использования разделительных (рассчитанных на 100 кВ) трансформаторов в цепи питания водородного генератора каждого из четырех РНД. Первичная обмотка каждого трансформатора питалась от своей тиристорной схемы, обеспечивающей плавную регулировку напряжения водородного генератора.

Отметим, что описанная конструкция РНД допускает его использование в периодическом режиме работы, т. е. когда первый и второй полупериоды разрядного тока равны по амплитуде. Как уже отмечалось, в описываемой установке разряд имеет характер затухающих колебаний, в данном случае это обстоятельство никоим образом не сказывается на долговечности РНД. Делая оценку ожидаемого ресурса РНД в описываемом эксперименте, можно исходить из того, что за один разряд через него переносится примерно 0,15 Кл электрического заряда. Исходя из паспортной величины для максимального суммарного переносимого заряда $5 \cdot 10^5$ Кл, получаем оценку ресурса разрядника как $3 \cdot 10^6$ разрядов. Следует, однако, заметить, что разработчиком РНД не были осуществлены ресурсные испытания до выхода его из строя. Проведенные же испытания имели целью достижение заданного (паспортного) суммарного перенесенного количества электричества. Вскрытие РНД данного типа после таких испытаний показывало его полную пригодность для дальнейшей работы. Иными словами, реальный полный ресурс РНД превышает (и, возможно, значительно) его паспортную величину.

СИСТЕМА ЗАПУСКА И СИНХРОНИЗАЦИЯ ПСЕВДОИСКРОВЫХ РАЗРЯДНИКОВ “ЭВОЛЮТА-1”

Для достижения высокой воспроизводимости (стабильности) параметров рентгеновского излучения, получаемого на установке типа “Плазменный фокус” (ПФ), необходимо добиться того, чтобы временной разброс срабатывания используемых для коммутации силовоточных разрядников “Эволюта-1” был минимальным (не более нескольких единиц наносекунд). Это требование обусловлено также соображениями безопасности — при таком разбросе начала разряда каждого конденсатора оказывается невозможной ситуация, при которой разряд конденсатора, начавшего разряжаться первым, пойдет не на ПФ, а на другой, “запоздавший” конденсатор.

Предложенная разработчиками этих разрядников схема запуска РНД (она обеспечивала фронт пускового импульса 0,5 мкс) не позволяла обеспечить выполнение этого условия. Поэтому нами был опробован ряд иных схем. Наиболее лучшие результаты получены при использовании для этой цели генератора, в котором формирование прямоугольного импульсного напряжения осуществляется с помощью коаксиальных кабелей и разрядника высокого давления (1—5 атм). Принципиальная схема запуска показана на рис. 3. В устройстве

использованы один 4-канальный газовый разрядник и, соответственно, по четыре зарядных и разрядных кабеля, каждый длиной 6 м (на рис. 1 изображен один канал). Таким образом, система позволяла получать импульсы высокого напряжения (4—5 кВ), имеющие длительность $t = 2l/V_{\phi}$, где V_{ϕ} — скорость распространения электромагнитной волны в кабеле, а l — длина кабеля. Длительность переднего фронта импульса определяется индуктивностью разрядника и разрядного промежутка в нем. В нашем случае передний фронт оказался около 6 нс, длительность импульса — 60 нс.

При разработке данной схемы были испытаны различные варианты газовых разрядников: 3-электродный разрядник, 2-электродный разрядник.

В первом случае третий электрод, расположенный между двумя основными электродами, служил для инициирования (поджига) разряда, тогда как во втором случае схема работала в режиме “самопробоя”.

Пробой 3-электродного разрядника происходил при импульсном снятии напряжения с этого электрода (искажении поля). Для этого использовалась схема на высоковольтном транзисторе типа КТ-838А, работающая в режиме ключа. Запуск самого транзистора осуществлялся от генератора типа Г5-54. Испытания показали, что несмотря на весьма высокую крутизну поджигающего импульса в этом случае (около 2 нс), при работе плазменной установки в герцовом режиме через несколько сотен импульсов из-за эрозии электродов требовалась дополнительная подстройка разрядного зазора между электродами. Поэтому в целях обеспечения устойчивой бесперебойной работы системы в герцовом режиме нами в дальнейшем был использован 2-электродный разрядник, работающий в режиме самопробоя. Снижение нестабильности момента пробоя газового промежутка достигалось тем, что разрядник настраивался на самопробой задолго до достижения максимума зарядного напряжения (в нашем случае — при 6 кВ против максимального напряжения 15 кВ).

Герцовость работы разрядника обеспечивалась схемой импульсной зарядки зарядных кабелей (см. рис. 3). Для синхронизации с диагностирующей аппаратурой разрядник был дополнен еще одним каналом, т. е. дополнительно использовались еще один зарядный и один разрядный кабели. Импульс поджига подавался на управляющий электрод псевдоразрядника через разделительный конденсатор КВИ-3 СЗ. Для снятия заряда с кабелей использовалось шунтирующее сопротивление, установленное в одном из каналов.

КАМЕРА ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

В данном эксперименте за основу была взята миниатюрная камера ПФ, первоначально разработанная как источник нейтринного излучения с использованием в качестве рабочего газа дейтерия. Камера позволяла получать до 10^8 быстрых нейтронов за разряд при запасенной в накопителе энергии в 3 кДж. При низкоиндуктивном разряде в камере ПФ на ее оси формируется короткоживущее (10—100 нс) образование горячей (T_e и T_i до 1 кэВ), плотной (до 10^{19} частиц в см^3) плазмы, которое во время своего существования является источником рентгеновского излучения широкого спектра и нейтронов (это образование носит название “плазменный фокус”). Electroды камеры изготавливаются из бескислородной меди особой чистоты. При сборке камеры применяются специальные технологии, такие, как сварка металла электронным лучом, нанесение на керамическую поверхность напылением некоторого слоя металла таким образом, чтобы сделать ее пригодной для последующего вакуумно-плотного сваривания с металлическими деталями и т. д. Важными отличительными особенностями камеры являются отсутствие в ней каких-либо резиновых уплотнений и согласование стыкуемых материалов по КТР.

Чтобы приспособить данную камеру для рентгенолитографии, потребовалось изменить конструкцию внутреннего ее электрода с тем, чтобы выводить сквозь него рентгеновское излучение с последующим его каналированием к облучаемой

мишени с угловой апертурой 5 град. Для увеличения интенсивности излучения, снимаемого с камеры ПФ в требуемом для рентгенолитографии диапазоне энергии квантов мягкого рентгеновского излучения — МРИ ($9-14 \text{ \AA}$), в качестве рабочего газа был использован неон (линии IX и X). Замена обычного для данного типа камеры ПФ дейтерия на неон потребовала внесения некоторых изменений в ее конструкцию, необходимых для соблюдения условий согласования электрических параметров разряда с динамическими. В частности, длина внутреннего электрода L (рис. 5) варьировалась в диапазоне 35—54 мм (оптимальная длина ~ 45 мм).

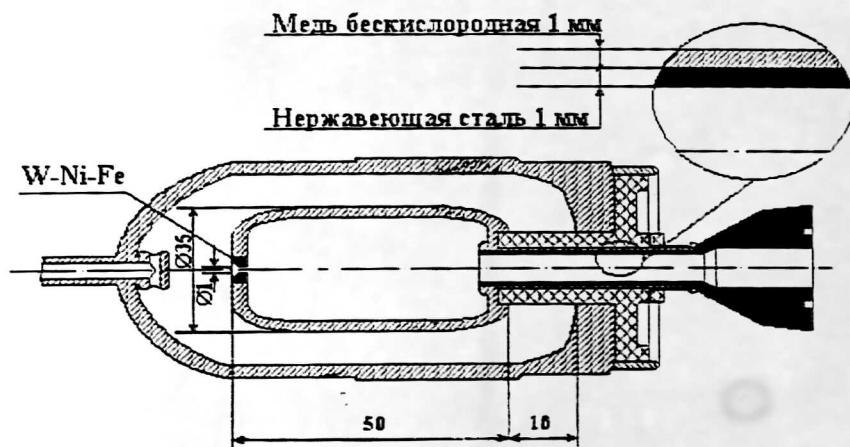


Рис. 5. Миниатюрная камера плазменного фокуса

Для каждого варианта камеры с измененным внутренним электродом экспериментально подбирались начальное давление заполняющего камеру рабочего газа. Критериями подбора были совпадение момента образования “плазменного фокуса” с началом спада кривой разрядного тока, а также глубина т. н. “особенности” на токовой осциллограмме. Возможно, что оптимальное сочетание длины электрода и величины начального давления газа, с точки зрения увеличения дозы рентгеновского выхода, в ходе этих экспериментов еще не достигнуто. Если в первых экспериментах, проводившихся с накопителем энергии на одном конденсаторе (см. ниже), хорошо себя зарекомендовала камера ПФ, отличающаяся от базовой только наличием канала для рентгеновского излучения во внутреннем электроде, то переход к полномасштабному эксперименту с четырьмя конденсаторами потребовал существенного увеличения механической прочности этого канала, поскольку магнитное поле возросшего в этом случае разрядного тока оказалось настолько большим, что его давление раздавливало канал за 3—5 десятков “выстрелов”. Этот недостаток удалось преодолеть, выполнив внутренний электрод с выводным каналом, состоящим из двух частей: коаксиальных трубок из меди и из нержавеющей стали, сваренных между собой в наружной части камеры. Внутренний электрод камеры ПФ в последнем ее варианте имеет вставку, выполненную из тугоплавкого сплава W—Ni—Fe, с отверстием диаметром 1 мм, что, наряду с увеличением долговечности камеры, даст возможность в последующих экспериментах применять дифференциальную вакуумную откачку объема самой камеры ПФ и камеры для рентгенолитографии. Данное обстоятельство весьма важно ввиду большой поглощательной способности газообразного неона в пределах рабочего диапазона длин волн РИ. Один из последних вариантов камеры ПФ схематически изображен на рис. 5, из которого видно, что данная камера ПФ не может быть отнесена ни к Филипповскому [3], ни к Мэйзеровскому [4] типам. Конфигурация электродов помещает ее в некое промежуточное место между указанными известными типами. Камера такой конструкции позво-

ляет облучать мягким рентгеновским излучением квадратную площадку со стороны 27 мм, удаленную от ПФ на расстояние, равное 430 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТ С ОДНИМ КОНДЕНСАТОРОМ

Этот эксперимент предвлял полномасштабные испытания описанной выше установки и имел целью проверку работоспособности ее элементов. В нем в качестве накопителя энергии использовался один высоковольтный конденсатор с теми же параметрами, что и описанные выше, но представляющий собой более раннюю разработку того же производителя и отличающийся от них большими размерами и массой. Поджиг разрядника низкого давления в данном эксперименте производился по схеме, разработанной его изготовителем (рекомендованные параметры поджига приведены выше).

Существенное отличие предварительного эксперимента от основного (помимо масштабных) — использование зарядной схемы с отрицательным внутренним электродом ПФ и, соответственно, положительным внешним (корпусом камеры). Известно, что когда камера ПФ используется как генератор нейтронного или жесткого рентгеновского излучения, условие, согласно которому внутренний ее электрод служил анодом, является существенным. Многолетнее изучение феномена ПФ показывает, что именно в этом случае при пинчевании тока имеют место обрывные явления, приводящие к эффективному ускорению заряженных частиц в плазме и, как следствие этого, к генерации жестких излучений. Для получения же мягкого рентгеновского излучения из плазмы ПФ в виде тормозного и линейчатого излучений горячей неоновой плазмы представлялось не обязательным достигать условия, при которых наблюдались бы обрывные явления тока и ускорение потоков заряженных частиц. Вопрос о полярности электродов, казалось бы, терял свою актуальность. Тем не менее, при обсуждении конструкции основной установки авторами было принято решение использовать традиционную для ПФ полярность электродов и выводить излучение через канал во внутреннем — положительном электроде. Решение выводить излучение именно через анод продиктовано тем, что во время разряда при формировании ПФ в сторону катода направлена мощная кумулятивная струя плазмы (и поток ускоренных ионов в случае, когда ускорение частиц имеет место). Если выводить излучение через катод, что конструктивно легче осуществить, то возникает проблема предохранения выводных диафрагм, бериллиевых фильтров и пр. от разрушающего воздействия плазменной и ионной струй. Кроме того, вследствие большой поглощательной способности рабочего газа (неона) относительно рабочего излучения (длины волны 9—14 Å) весьма желательна дифференциальная откачка этого газа. Эта откачка должна начинаться в области, максимально приближенной к пинчу. При выводе излучения через катод такую конструкцию реализовать представляется затруднительным. В случае анодного вывода эти проблемы отсутствуют. Нужно добавить, что в основной установке, как уже отмечалось, камера расположена выводным каналом вверх. Это избавляет также от необходимости искать решение проблемы очистки выводного фильтра от падающих на него из зоны ПФ макрочастиц, как это делается, например, в работе [8], где излучение выводится вниз.

Однако для предварительного эксперимента с одним конденсатором внутренний электрод камеры ПФ был выбран в качестве катода. В нашем случае это было вызвано соображениями упрощения сборки установки, предназначенной в основном лишь для испытания электрических систем. Однако, тем не менее, этот выбор позволил, как будет видно, лишний раз убедиться в том, что плазменный фокус более работоспособен в случае положительного внутреннего электрода. Заметим, что высокое напряжение от единого блока "конденсатор плюс разрядник" подводилось к токовому коллектору (имеющему практически такую же конструкцию, как и в основной установке) шестью отрезками коаксиального высоковольтного кабеля длиной 1 м. Камера при этом могла быть ориентирована в пространстве как угодно, но и в данном эксперименте было использовано ее горизонтальное расположение.

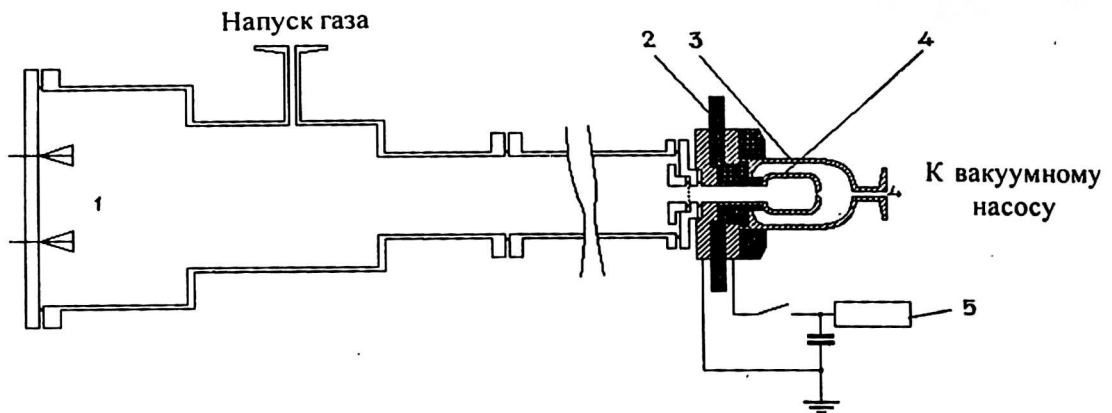


Рис. 6. Схема эксперимента на установке с одним конденсатором:
 1 — детекторы; 2 — изолятор; 3 — внешний электрод;
 4 — внутренний электрод; 5 — зарядное устройство

На рис. 6 изображена схема предварительного эксперимента на данной установке. Было произведено около 5000 разрядов, в том числе с максимальной частотой до 10 Гц. В опытах конденсатор заряжался до напряжения 13—15 кВ; разрядный ток при этом достигал величин 110—120 кА. Начальное давление рабочего газа (неона) варьировалось в широких пределах: 0,1—25 мбар; в интервале давлений газа 0,5—2,0 мбар с помощью PIN-диодов зарегистрированы короткие (60 нс) импульсы рентгеновского излучения (рис. 7). Интересно отметить, что момент генерации рентгеновского излучения приходится на вторую полуволну разрядного тока, т. е. на то время, когда внутренний электрод камеры ПФ берет на себя функции анода. Этому моменту соответствуют т. н. “особенности” на кривых тока, напряжения и производной тока. В ряде случаев подобные “особенности” наблюдались на указанных кривых и в первой полуволне разряда (как, например, на рис. 7), но наблюдаемые рентгеновские импульсы всегда соответствовали “особенностям” второй полуволны. Не вдаваясь в детальное обсуждение отмеченного явления, подчеркнем, что основная причина его — нетрадиционная полярность включения камеры ПФ в зарядную цепь. Очевидно, что этой же причиной объясняется не слишком высокая интенсивность рентгеновского излучения в данном эксперименте, которая в лучших разрядах не намного превышала 0,5 Дж в полный телесный угол.

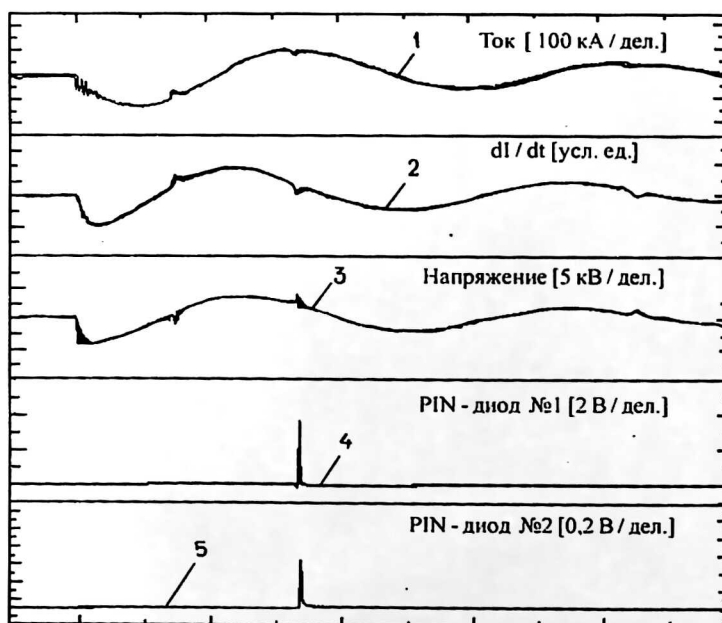


Рис. 7. Осциллограммы тока (1), напряжения (2), производной тока (3) и импульсов (4, 5) рентгеновского излучения

Установка работала как в однократном, так и в частотном режиме. Диапазон использованных частот составлял от 0,1 до 10 Гц.

Производились серии в 100 или 200 разрядов. Основным результатом эксперимента — показана работоспособность выбранных элементов схемы в частотном режиме. Установлено, что самая высокая температура достигается внутри самой камеры ПФ. При этом при применении простейшего внешнего водяного охлаждения корпуса камеры ее перегрев оказался основным фактором, ограничивающим продолжительность серий. На частоте 10 Гц из опасения чрезмерного перегрева внутреннего электрода камеры ПФ продолжительность испытательных серий не превышала 50 разрядов. Из экспериментов стало ясно, что для эффективного охлаждения камеры необходимо обеспечить прежде всего интенсивный отвод тепла от внутреннего ее электрода. По результатам частотного эксперимента с одним конденсатором принято решение о разработке новой конструкции камеры ПФ, допускающей проточное охлаждение ее внутреннего электрода.

ОСНОВНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Батарея из четырех конденсаторов основной установки заряжалась до напряжения 12 кВ. Точная величина емкости батареи составила 31,2 мкФ; запасаемая в накопителе энергия, таким образом, составляла перед каждым разрядом 2,25 кДж. На установке произведено более 20 тыс. разрядов. Поджигающая система после некоторой настройки обеспечивала синхронное срабатывание четырех коммутаторов с временным разбросом не более 2 нс. Ток разряда при этом достигал в максимуме первой полуволны величины 280 кА. Как уже отмечалось, в основном эксперименте полярность включения зарядной схемы была такова, что внутренний электрод камеры ПФ являлся анодом. При этом на осциллограммах разрядного тока и напряжения, практически с первых же включений, стала наблюдаться выраженная "особенность", местоположение которой примерно соответствовало максимуму тока (рис. 8). Начальное давление рабочего газа (неона) в камере варьировалось в пределах 5—25 мбар. Изменение начального давления рабочего газа было тем инструментом, с помощью которого для каждого варианта камеры ПФ, имеющего определенную длину анода, можно было добиться наилучшего соответствия электрических и динамических характеристик разряда. При удачном выборе начального давления "особенность" попадала точно на максимум осциллограммы тока. Интенсивность рентгеновского излучения при этом оказывалась максимальной.

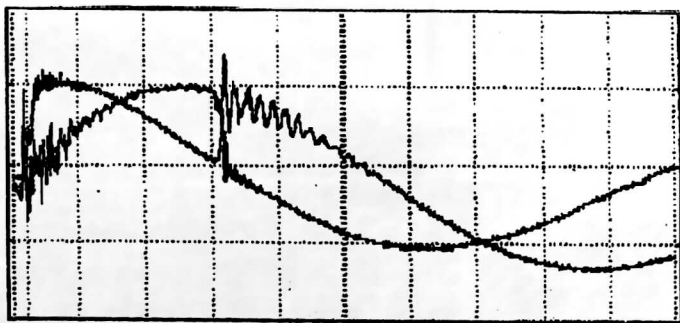


Рис. 8. Осциллограммы тока и напряжений в основном эксперименте.

Установка работала в режиме однократных запусков и короткими сериями на различных частотах. Для зарядки батареи было применено зарядное устройство ограниченной мощности (3 кВт), которое в частотном эксперименте с полной батареей позволило поднять частоту разрядов лишь до 3,5 Гц. По сравнению с экспериментом на одном конденсаторе, в основной установке использовались камеры ПФ и токовый коллектор с более массивным вводом внутреннего электрода, что должно было обеспечить более надежный электрический контакт

ввода и более интенсивный теплоотвод от электрода. Однако таким способом не удалось полностью решить проблему перегрева камеры при работе на частоте. По-видимому, данная проблема будет решена только с разработкой камеры ПФ с проточным охлаждением.

Мягкое рентгеновское излучение плазменного фокуса регистрировалось с помощью двух PIN-диодов типа ВРХ 65, удаленных от ПФ на 62 см. Камера для литографии с размещенными в ней PIN-диодами была разделена с камерой ПФ бериллиевым фильтром толщиной 20 мкм. Объем ее вакуумно откачивался диффузионным насосом, так что для излучения требуемого диапазона длин волн (9—14 Å) путь от фильтра до детектора был прозрачен. Однако столб неона внутри камеры ПФ и бериллиевый фильтр существенно ослабляли излучение указанного диапазона (серьезный недостаток данного эксперимента, который будет исправлен с применением дифференциальной откачки). Тем не менее, детекторы уверенно регистрировали сигналы от рентгеновской вспышки ПФ (рис. 9). Применение двухканальной методики (с двумя разными фильтрами) позволило с достоверностью определить принадлежность зарегистрированного излучения именно к указанному диапазону длин волн. Дозовые вычисления по результатам регистрации с использованием кривых пропускания неона и материалов использованных фильтров дало возможность определить интенсивность зарегистрированного излучения. Для наиболее удачного варианта камеры ПФ (с анодом длиной 43 мм) она составила в среднем около 100 Дж за вспышку в полный телесный угол. Для уверенности в полученном результате применялись следующие методики измерения абсолютного выхода МРИ: PIN-диоды, рентгеновские калориметры, вакуумные диоды, а также фотопленка RAR 2495, откалиброванные с помощью импульсных лазеров, лазерной плазмы как источника МРИ, изотопных источников методом двойной экспозиции, а также на пучке синхротронного излучения ускорителя ФИАН.

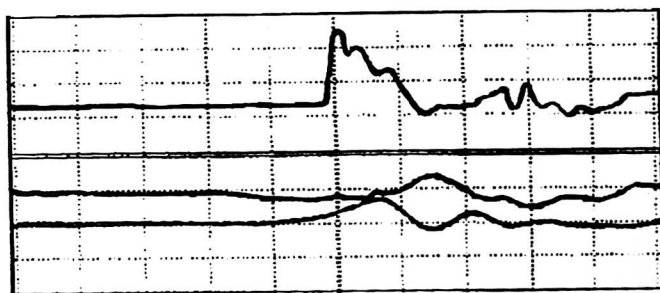


Рис. 9. Импульсы рентгеновского излучения в основном эксперименте

В заключение были проведены демонстрационные эксперименты по облучению позитивных рентгенорезистов типа РММА, обладающих чувствительностью порядка 1 Дж/см². Эти эксперименты подробно описаны в следующей статье. Здесь же мы приведем их главный результат: тестовые объекты с характерными размерами 100 и 5 мкм успешно регистрируются с высоким контрастом на вышеуказанных резистах, расположенных на расстоянии около 40 см от источника, примерно за 100 вспышек. Для уменьшения количества вспышек ПФ, необходимых для экспонирования резистов, и перехода в область пространственных элементов с размерами порядка 0,1 мкм, необходимо использовать специальные

рентгенорезисты с повышенной в области 9—14 Å чувствительностью и принимать специальные меры по подавлению влияния вибрации установки при многократном облучении резиста на размытие изображения.

Литература

1. Kato J., Ochiai T., Watanabe Y. and Murayama S. // J. Vac. Sci. & Technol, 1988. B-6. P. 195; Press-release of SUSS Advanced Lithography, Inc., Waterbury Center, Vermont, 1997.
2. Prasad R. R., Krishnan M., Mangano J., Greene P. A. and Greene N. // SPIE. 1994. V. 120, P. 2194.
3. Filippov N. V., Filippova T. I. and Vinogradov V. P. // Nucl. Fus. Suppl, 1962. V. 2. P. 577.
4. Mather J. M. // Phys. of Fluids. 1960. V. 3. P. 134.
5. Bochkov V. D., Zaydman S. Sh., Sirota E. I., Nechaev A. G. and Kanareykin N. A. // Patent RF № 1792207; H 0 1 T 1/23, 01.04.91.
6. Bochkov V. D., Zaydman S. Sh. and Vosmerik Yu. M. // Patent RF № 1807798; H 0 1 J 17/44, 01.10.90.
7. Bochkov V. D., Korolev Yu. D. and Shemyakin I. A. Proc. of Conf. on Low Temp. Pl. Phys. — Petrozavodsk, 1995.
8. Sato T., Ochiai I., Kato Y. and Murayama S. // J. of Appl. Phys., 1991. № 2. P. 385.

Авторы выражают благодарность Н. Калачеву (ФИАН)
и В. Самарину (ВНИИА) за помощь в подготовке данных экспериментов.

REPETITIVE POWERFUL SOFT X-RAY RADIATION SOURCE ON THE BASIS OF PLASMA FOCUS FOR VARIOUS APPLICATIONS

V. A. Veretennikov, V. A. Gribkov, A. V. Doubrovski, A. I. Isakov,
O. N. Krokhin, V. Ya. Nikulin, P. V. Silin

P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

P. Lee, S. Lee, A. Serban, X. Feng, G. X. Tsang
Nanyang Technological University, Singapore

V. D. Bochkov

Scientific Production Corporation "Plazma", Ryasan, Russia

L. T. Vekhoreva

Sankt-Petersburg State Politechnical University, Sankt-Petersburg, Russia

E. P. Bogolubov, Yu. P. Ivanov

VNIIA, Moscow, Russia

The source of soft X-ray radiation on the basis of plasma focus is developed and tested. Four high-voltage pulse condensers of a type KMK-30-8 with total energy up to 15 kJ were used as the energy store. 4 pseudo spark gaps, each capable to switch a current up to 150 kA, were used as switching device. One of the main problems, solved at the installation design was to ensure its high durability. The decision of this problem is based on a collection of the perfect modern elements and systems and on a reduction of their operational parameters in comparison with possible allowable. At the achieved discharge current of installation of 280 kA and at its operational frequency of 3,5 Hz the resource is estimated as 10^7 operations (about one year of continuous work). The plasma focus chamber filled with Neon under the pressure 10–25 mbar was used as a soft X-ray source. The plasma focus soft X-ray radiation was led out through the channel in an internal electrode (anode) along the axis of the chamber. The 4-capacitors installation has made about 20000 discharges. The mode with an average X-ray yield of more than 100 J per discharge is found. The demonstrational experiment on the X-ray resist irradiation have been made.