Глава 1. Наносекундные ускорители электронов для радиационных технологий

1.1. Наносекундные ускорители электронов

Среди широкого спектра ускорителей наибольшее применение в коммерческих целях нашли ускорители постоянного тока и линейные ускорители. Такие ускорители выпускаются в широком диапазоне параметров в России и за рубежом (табл. 1.1, 1.2), обладают высоким кпд преобразования электрической энергии в энергию пучка, стабильностью параметров пучка и надежностью.

Однако, при всех достоинствах ускорители постоянного тока и линейные имеют и существенный недостаток – высокую стоимость (Рис. 1.1), которая является результатом использования высокого напряжения постоянного тока, а также вакуумных диодов с высоким вакуумом. Переход же к импульсным ускорителям, особенно наносекундного диапазона позволяет резко уменьшить габариты схем формирования высокого напряжения за счет увеличения электрической прочности изоляции при импульсном воздействии. Кроме того, наносекундные вакуумные диоды существенно проще по конструкции и способны работать при относительно низком вакууме, вплоть до форвакуума (~10^{-2} Торр [1.1]).

Вместе с тем формирование наносекундного импульса высокого напряжения представляет нетривиальную задачу, которая осложняется многостадийностью процесса. Обычно имеется накопитель энергии, в котором сравнительно медленно накапливается энергия. Затем она быстро передается в нагрузку – вакуумный диод с помощью коммутатора. В связи с тем, что накопитель, коммутатор и нагрузка имеют различные технические ограничения и паразитные параметры, процесс передачи энергии не удается выполнить за одну стадию и приходится использовать промежуточный этап сжатия энергии.

В настоящее время используется два основных подхода [1.2]: с индуктивным и емкостным промежуточным накопителем энергии, которые требуют различные виды коммутаторов: размыкатель (прерыватель) и замыкатель (разрядник).

При создании систем питания наносекундных ускорителей с промежуточным емкостным накопителем энергии, в качестве которого обычно выступает формирующая линия (или двойная формирующая линия), используются две основных схемы, предполагающие наличие разрядника перед нагрузкой:

1) с зарядкой формирующей линии от генератора импульсных напряжений (ГИН), обычно выполненного по схеме Аркадьева–Маркса [1.2];

Таблица 1.1. Параметры ускорителей постоянного тока

Тип ускорителя	**Энергия электронов, МэВ**	**Средняя мощность пучка, кВт**	**Ток пучка, мА**	**Литература**
ELV-mini	0.2-0.4	20	50	[1.3]
ELV-0.5	0.4-0.7	25	40	[1.3]
ELV-1	0.4-0.8	25	40	[1.3]
ELV-2	0.8-1.5	20	25	[1.3]
ELV-3	0.5-0.7	50	100	[1.3]
ELV-4	1.0-1.5	50	100	[1.3]
ELV-6	0.8-1.2	100	100	[1.3]
ELV-8	1.0-2.5	90	50	[1.3]
ELV-6M	0.75-0.95	160	200	[1.3]
Torch	0.5-0.8	500	800	[1.3]
ELV-12	0.6-1.0	400	400	[1.3]
HFELV-2	0.5	16	-	[1.4]
HFELV-3	1	16	-	[1.4]
HFELV-4	1	32	-	[1.4]
Электрон-3	0,5-0,75	5-7	-	[1.5]
Электрон 7-1	2,5	100	100	[1.6]
Электрон 10	0,75	-	70	[1.7]
Precision Scan 500	5/10	4	-	[1.8]
Type 1	0,08-0,3	-	200	[1.9]

Таблица 1.2. Параметры линейных ускорителей

Тип ускорителя	**Энергия электронов, МэВ**	**Средняя мощность пучка, кВт**	**Ток пучка, мА**	**Потребляемая мощность, кВт**	**Масса, т**	**Литература**
ILU-8	0.6-1.0	20	25	80	0.6	[1.10]
ILU-6	1.2-2.5	20	17	100	2.2	[1.10]
ILU-6M	1.0-2.0	40	20	120	2.2	[1.10]
ILU-10	2.5-4.0	50	20	150	2.9	[1.10]
ILU-10M	2.5-4.0	30	12	120	2.5	[1.10]
ЛИУ 0,4/4000	0,4	30*	4000*	75	2,3	[1.11]
б/н	3	1	-	12	2,5	[1.12]
ЛУ-10-20	7-9	12-15	-	150	-	[1.13]

** В импульсе длительностью 110 нс с частотой 0,4-80 Гц.*

Таблица 1.3. Параметры импульсно-периодических ускорителей

Тип ускорителя	**Энергия электронов, кэВ**	**Ток пучка, кА**	**Длительность импульса, нс**	**Частота повторения, Гц**	**Литература**
SINUS-200	350(200)*	3.5(2)	3	0.1(1000)	[1.14]
SINUS-700	1000(800)	10(8)	30	0.1(200)	[1.14]
SINUS-7	2000(1500)	20(15)	40	0.1(100)	[1.14]
СИНУС-5	700	6	50	100	[1.15]
СИНУС-6	400	8	25	100	[1.15]
б/н	700	5	10	100	[1.16]
РИТА-150	150	0,5	10	15	[1.15]
РАДАН-220	200	-	3	10 (50)	[1.17]
РАДАН-303	300	6	4-5	10 (100)	[1.17]
RHEPP II	2 000	25	60	120	[1.18]

**Значения для кратковременного режима работы.*

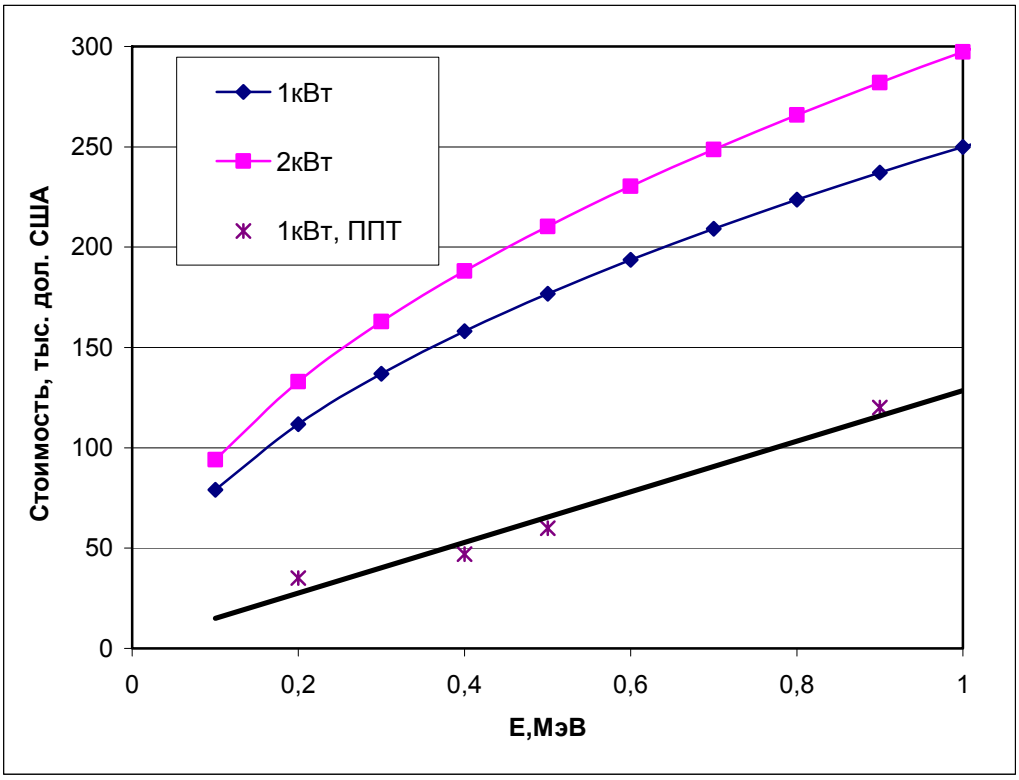


Рис. 1.1. Стоимость ускорителей постоянного тока, рассчитанная по эмпирической формуле (Стоимость $=250*E^{0,5}*P^{0,25}$, *E- энергия электронов, МэВ, P – мощность в пучке, кВт)* с различной мощностью в пучке и НУЭ с системой питания с ППТ (по фактическим затратам)

2) с зарядкой формирующей линии от импульсного трансформатора [1.14].Первая схема нашла применение в основном при создании мощных и сверхмощных [1.2] установок. Вторая схема применяется при создании частотных ускорителей [1.14, 1.1], но с учетом ее высокой компактности в ряде случаев использована и для мощных установок [1.19, 1.20].

Основная проблема в системах питания наносекундных ускорителей с промежуточным емкостным накопителем энергии – разрядник перед нагрузкой. Если в качестве коммутаторов в первичной обмотке импульсного трансформатора удается использовать элементы, позволяющие работать на большой частоте (тиратроны, тиристоры, псевдоискровые разрядники), то разрядник перед нагрузкой выполняется газовым и предельная частота его непрерывной работы (т.е. целый рабочий день, 8 ч) не превышает 100 Гц [1.1, 1.14]. Несмотря на это, создано несколько типов НУЭ с широким диапазоном параметров (табл. 1.3) с системой питания по данной схеме, которые нашли применение для генерации СВЧ-излучения и проведения научных исследований по использованию наносекундных пучков [1.14]. Однако коммерческое применение подобных ускорителей в технологиях будет ограничиваться как их высокой стоимостью, связанной со сложной технологией изготовления импульсного трансформатора, так и относительно низким ресурсом газового разрядника.

При создании систем питания наносекундных ускорителей с промежуточным индуктивным накопителем энергии в качестве него может выступать как специальный соленоид, так и собственная индуктивность контура. Каждый из подходов создания промежуточных накопителей имеет свои достоинства и недостатки. Применение промежуточного индуктивного накопителя позволяет получить существенно более высокие (в разы) плотности накопления энергии за счет того, что ограничения по плотности энергии в нем связаны с механической прочностью материала соленоида, а не электрической прочностью диэлектрика, как в емкостном накопителе. Это позволяет существенно уменьшить габариты и стоимость систем формирования импульсов. Отличие промежуточного индуктивного накопителя энергии состоит в том, что импульс напряжения на нем формируется при прерывании тока в контуре. Амплитуда импульса напряжения определяется величиной индуктивности и скоростью обрыва тока в контуре, а также видом и величиной нагрузки. Поэтому возможно получение напряжения, превышающего по величине значение, выдаваемое накопителем энергии, и уменьшить за счет этого его габариты и стоимость.

Однако создание прерывателя тока – более сложная инженерная задача, чем создание замыкателя, что и служит главной причиной, ограничивающей применение схем с промежуточным индуктивным накопителем энергии.

В настоящее время используются три основных типа прерывателей, которые устанавливаются параллельно нагрузке:

1) на основе электрически взрываемых проволок;
2) плазменные прерыватели тока;
3) полупроводниковые прерыватели тока (ППТ).

Существенным недостатком прерывателя на основе электрически взрываемых проволок [1.21] являются достаточно большие потери энергии (до 40%) на их электрический взрыв. На этом принципе нельзя создать конструкцию частотного прерывателя.

Плазменные прерыватели тока, принцип действия которых основан на эрозии плазмы в вакууме под воздействием протекающего через нее тока, приводящей к существенному изменению ее проводимости, могут успешно работать только при больших токах (более кА) [1.22]. Хотя имеются примеры использования плазменных прерывателей в частотном режиме [1.6], построение систем питания частотных ускорителей на их основе нецелесообразно по следующим причинам:

1) их работа возможна только при относительно больших уровнях отключаемого тока, диапазон изменения импеданса относительно узок, а его абсолютное значение не превышает десятков Ом;
2) требуются сложные и дорогостоящие системы создания плазмы прерывателя с требуемой частотой и точная синхронизация включения накопителя относительно генератора плазмы.

Все отмеченные причины оправдывают использование плазменных прерывателей только для создания мощных компактных систем для формирования одиночных импульсов [1.23].

Открытие SOS (Semiconductor Opening Switch)–эффекта [1.24], т.е. эффекта наносекундного обрыва сверхплотных токов в полупроводниках, позволило создать новый класс генераторов высоковольтных импульсов и систем питания НУЭ с промежуточным индуктивным накопителем энергии. Наиболее важная особенность этих генераторов – использование твердотельной коммутации с относительно небольшими потерями энергии на коммутацию, высокие стабильность параметров и частота следования формируемых импульсов, а также высокий ресурс и относительная дешевизна.

Таким образом, появление частотных полупроводниковых прерывателей тока позволило рассмотреть перспективность использования наносекундных ускорителей в радиационных технологиях [1.24-1.29].

1.2. Описание механизма работы полупроводникового прерывателя тока

Исследование свойств и параметров ППТ не было предметом данной диссертации, однако для понимания особенностей построения схем питания НУЭ с ППТ необходимо рассмотреть особенности его работы.

Принцип работы ППТ [1.24, 1.30] основан на создании электронно-дырочной плазмы во время прямой накачки, когда p-n-переход включен в прямом направлении и под действием возникающего электрического поля дырки из p-области дрейфуют в базу диода, а электроны из n-области перемещаются в обратном направлении и постепенно заполняют p-область структуры. При прямой накачке основной вклад в общее сопротивление прерывателя вносит базовая область p^+–p–n–n^+-структуры, поскольку концентрация носителей в ней минимальна. На начальной стадии накачки нарастание плотности тока через диод происходит быстрее, чем падение сопротивления базы, что приводит к появлению положительного всплеска напряжения на ППТ, а в базе возникает область сильного электрического поля. Затем сопротивление p^+–p–n–n^+-структуры становится меньше волнового сопротивления контура, вплоть до момента обрыва тока, и сопротивление через него определяется внешним контуром. К моменту завершения накачки подавляющая часть накопленного заряда сосредоточена в высоколегированных областях структуры: электроны в p-области, дырки в n^+-области. Минимум концентрации плазмы расположен в базе и имеет величину порядка 10^{16} см$^{-3}$.

После прохождения тока через ноль, во время обратного направления тока, плазма изменяет направление своего движения и начинает возвращаться к плоскости p-n-перехода. На этой стадии концентрация неравновесных носителей соответствует высокому уровню инжекции и основная плазма движется медленнее, чем ее фронт. В результате происходит обострение фронтов профиля плазмы сначала в p-области, а затем и n-области структуры.

После образования резких фронтов в пространственном распределении плазмы области p^+–p–n–n^+-структуры, расположенные за фронтами, оказываются практически полностью свободными от инжектированных носителей заряда. В этих областях перенос тока осуществляется только основными носителями, концентрация которых минимальна на внешней стороне фронтов плазмы. При приближении фронтов к точкам, где

плотность тока, текущего через структуру, станет равна плотности тока насыщения основных носителей, абсолютная величина поля на фронтах плазмы резко увеличивается, скорость дрейфа носителей приближается к скорости насыщения, а их подвижность падает. Уменьшение подвижности носителей означает, что в области фронтов образуются участки структуры с высоким эффективным сопротивлением. Это приводит к снижению тока через прерыватель. Амплитуда напряженности поля за фронтом плазмы ограничивается процессами генерации электронно-дырочных пар в результате ударной ионизации. При этом дополнительные носители обеспечивают прохождение тока через область с низкой концентрацией плазмы. В результате в полупроводниковой структуре возникает характерная область сильного поля с четко выраженными границами. Внешняя граница области, занятой полем, соответствует точке, где выполняется условие насыщения тока, и практически неподвижна, а внутренняя совпадает с положением фронта плазмы. Поскольку фронт плазмы продолжает перемещается в сторону базы, размер области, в которой существует сильное поле, увеличивается, отрицательное поле на структуре растет, а на прерывателе формируется фронт импульса напряжения.

Из анализа работы прерывателя вытекают следующие выводы [1.24]:

1) удаление всей избыточной плазмы из структуры – не обязательное условие обрыва тока, т.е. нет принципа равенства заряда, внесенного в структуру во время прямой накачки и удаленного из неё при обратной накачке;

2) обрыв тока определяется процессами в узких высоколегированных слоях p^+–p–n–n^+-структуры, свободных от избыточной плазмы, это и приводит к сочетанию высокой плотности обрываемого тока и наносекундному времени его отключения.

Кроме того, обнаружено, что существует автоматическое равномерное распределение напряжения по последовательно соединенным структурам, что позволяет осуществлять последовательно-параллельное соединение диодов без использования внешних систем распределения напряжения.

1.3. Применение полупроводниковых прерывателей тока

Из описания механизма работы ППТ следует необходимость прямой и обратной накачки прерывателя током, при этом требования к этим режимам существенно различаются, что создает необходимость выбора схем накачки ППТ.

К настоящему времени экспериментально опробованы несколько схем накачки ППТ:

1) одноконтурная схема [1.31, 1.32], при этом в качестве источника энергии использовался генератор Маркса или Фитча;

2) двухконтурная схема [1.24], при этом в качестве источника энергии прямой накачки использовался конденсатор с разрядником, а для обратной накачки - генератор Маркса, подключаемый через некоторое время задержки;

3) двухконтурная схема с режимом усиления обратного тока [1.25]. В качестве источника энергии прямой накачки и для зарядки конденсатора обратной накачки использовался магнитный компрессор энергии, а обратная накачка производилась разрядом конденсатора обратной накачки после срабатывания магнитного ключа обратной накачки;

4) двухконтурная схема с режимом усиления обратного тока [1.33, 1.34] с насыщаемым импульсным трансформатором вместо магнитного ключа обратной накачки.

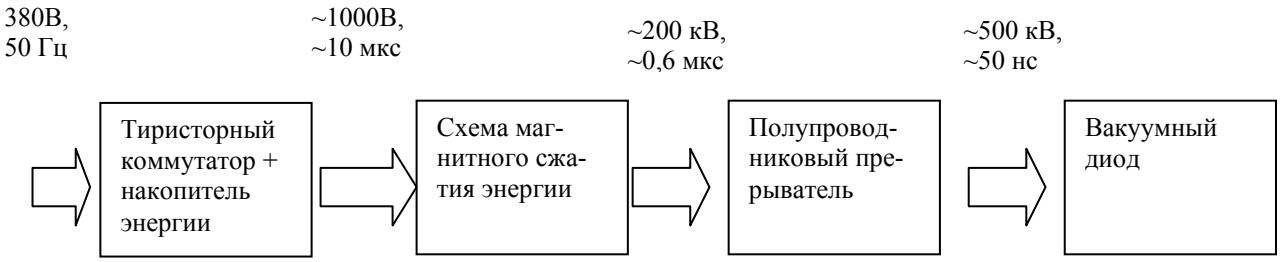
Отметим, что одноконтурная схема имеет много недостатков и использовалась только в первых экспериментах с ППТ. Двухконтурная схема позволяет снизить импульсную мощность генератора прямой накачки за счет снижения амплитуды тока и увеличения его длительности [1.24], при этом уменьшаются потери в структуре прерывателя при накачке. Двухконтурная схема с режимом усиления обратного тока с насыщаемым импульсным трансформатором наиболее целесообразна для построения систем питания НУЭ, так как позволяет все предварительные ступени сжатия импульса до параметров, необходимых при накачках ППТ, выполнять при пониженном напряжении.

Вопрос о выборе пути предварительного сжатия импульса нетривиален. В настоящее время он решается двумя путями (Рис.1.2):

1) с использованием схем предварительной магнитной компрессии энергии;
2) по схеме тиратрон–импульсный трансформатор–ППТ.

Главное достоинство первого решения состоит в том, что схема формирования высоковольтного импульса полностью твердотельная, имеет высокую частоту работы и большой ресурс. Данное решение в настоящее время практически единственно возможное, при создании генераторов с ППТ с импульсной мощностью до ~ 10^9 Вт и средней мощностью в десятки кВт [1.35]. Однако при выходном напряжении 0,5–1 МВ, данная схема имеет относительно низкий кпд, при этом основные потери энергии возникают в схеме предварительной магнитной компрессии энергии (кпд 50%). Это привело авторов работы [1.35] к выводу о необходимости уменьшения количества звеньев сжатия энергии за счет использования реверсивно включаемых динисторов [1.36].

А



Б

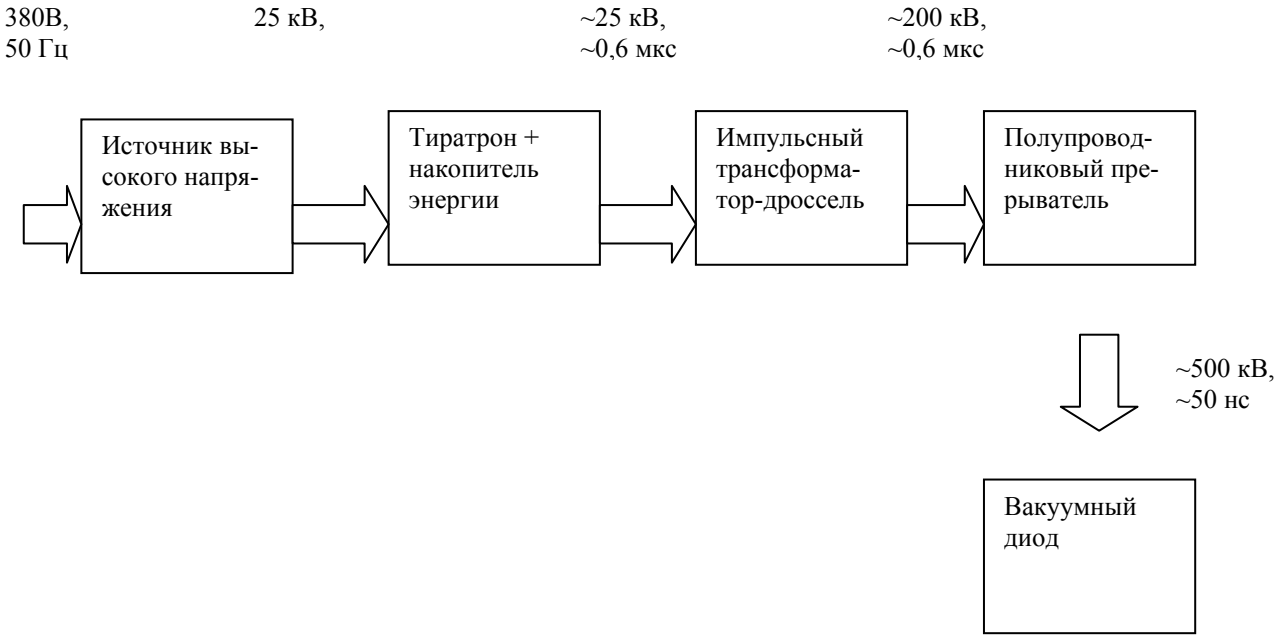


Рис. 1.2. Схемы построения систем питания НУЭ с ППТ

Схема тиратрон–импульсный трансформатор широко используется для предварительного сжатия энергии при формировании наносекундных импульсов [1.37]. К достоинству схемы можно отнести ее относительную простоту и меньшие габариты (в 1,5-2 раза по сравнению с магнито-тиристорными генераторами [1.37]). Она не содержит взаимосвязанных контуров магнитного сжатия энергии, что существенно упрощает настройку и ремонт, делает ее пригодной для серийного производства. Кроме того, имеется возможность практически линейного регулирования ускоряющего напряжения за счет изменения зарядного напряжения.

Главный недостаток схемы состоит в том, что она содержит тиратрон (псевдоискровой разрядник–тиратрон с холодным катодом), который имеет существенно более низкий ресурс (500-1000 ч), чем остальные элементы схемы. Однако это относительно недорогой прибор, выпускаемый промышленностью в больших количествах, и его применение в ряде случаев может быть оправданно. Например в схемах питания ускорителей, которые всегда содержат другое электровакуумное устройство – вакуумный диод. В НУЭ применяются либо отпаянные вакуумные трубки, либо откачиваемые вакуумные диоды. Ресурс отпаянных трубок не превышает 10^6 импульсов [1.5] (11 ч на частоте 25Гц), а наработка на отказ (обычно прорыв выходной фольги) откачиваемых вакуумных диодов, как правило, не превышает 100 ч.

1.4. Расчет схем питания НУЭ с полупроводниковыми прерывателями тока

Основными исходными данными к расчету схемы питания НУЭ по схеме тиратрон–импульсный трансформатор–ППТ (рис. 1.3) являются требуемые величины ускоряющего напряжения и средней мощности.

Ниже, для упрощения, под энергией электронов будет пониматься именно величина, соответствующая максимальному значению ускоряющего напряжения. Конечно, это не совсем верно–формируемый пучок немоноэнергетичен (см. Введение.В2). Амплитуда ускоряющего напряжения задает верхнюю границу энергии спектра формируемых электронов. Спектра, потому что формирование пучка начинается на переднем фронте и продолжается на спаде импульса напряжения. Кроме того, формируется небольшая доля электронов с энергией, превышающей ускоряющее напряжение [1.38].

Таким образом, исходя из толщины конкретного изделия, его упаковки или слоя материала (подробно этот процесс рассмотрен в главах 4 и 5), которые необходимо облучить, находится эффективная энергия электронов E_e с учетом их проникающей способности. Амплитуда же ускоряющего напряжения должна быть на 10–15% выше E_e.

Исходя из требуемой поглощенной дозы, площади облучаемого изделия, сменности работы и производительности облучающей установки (см., например, табл. В.3), определяется требуемая средняя мощность в пучке. Методика и примеры расчета систем питания НУЭ с ППТ приведены в приложении.

1.5. Описание ускорителей для радиационных технологий (УРТ)

1.5.1. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,2

Частотный наносекундный ускоритель электронов с ускоряющим напряжением до 200 кВ (УРТ-0,2) разработан для проверки возможности создания и отработки основных узлов системы питания ускорителя по схеме тиратрон–импульсный трансформатор–ППТ. Выбранное относительно небольшое значение ускоряющего напряжения 200 кВ позволяло, с одной стороны минимизировать риск, а с другой, создать ускоритель первой группы (см. введение), пригодный для использования в радиационных технологиях в газах, на поверхности изделий и для тонких пленок. После выполнения расчетов (см. приложение) найдены значения электрических параметров контура и сердечника ИТ, которые послужили основой для создания конструкции системы питания ускорителя.

Естественно, что в реальной конструкции не всегда возможно точно реализовать расчетные значения из-за ограничений, например, в сортаменте и номиналах выпускаемых или доступных конденсаторов, а также доступности марок и толщин материалов и особенностей технологии намотки колец для создания сердечника ИТ. Поэтому значения табл. П.7 были лишь первой итерацией выполнения расчетов системы питания ускорителя, что, однако, не уменьшает их значения. Затем производилась оптимизация параметров контура в целях получения заданного ускоряющего напряжения.

Схема ускорителя УРТ-0,2 [1.39] приведена на рис. 1.3, на ней не показаны схемы запуска и питания накала тиратрона. Используемый для коммутации водородный импульсный тиратрон ТГИ1-1000/25 (Л1) позволяет синхронизировать момент срабатывания ускорителя с разбросом не более 5 нс и работать с частотой повторения импульсов до f=700 Гц [1.40] при амплитуде тока до 1кА и скорости нарастания до 4 кА/мкс. Импульсный трансформатор (ИТ) намотан на сердечнике К125*75*25 мм^3 из пермаллоя 50НП толщиной 10 мкм. Коэффициент трансформации равен 6, индуктивность рассеяния составляет ~0,7 мкГ.

Вакуумный диод ускорителя работает на форвакууме при давлении около 10^{-2} Торр. Вакуумный изолятор состоит из трех колец из полиметилметакрилата высотой 3

см каждое, разделенных металлическими градиентными кольцами. На кольцах установлены металлические экраны, которые экранируют поверхность диэлектрика [1.41]. В ускорителе используется многоточечный металлодиэлектрический (МДМ) катод [1.42] размером 200*20 мм^2. Для вывода пучка вакуумный диод имеет выпускное окно размером 250*40 мм^2, закрытое алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм.

Напряжение на формирующей емкости C_1 и напряжение на вакуумном диоде измерялись с использованием омических делителей (ОДН-1 и ОДН-2) из резисторов ТВО цифровым осциллографом «Tektronix TDS 620B». Значение полного тока вакуумного диода, протекающего через катододержатель при его проходе через плоскость земляного электрода вакуумного диода, измерялось на том же осциллографе при помощи трансформатора тока, установленного на этом же электроде. Схема формирования высоковольтного импульса и вакуумный диод размещаются в металлическом корпусе диаметром 200 мм и длиной 500 мм, заполненном трансформаторным маслом. Источник высокого напряжения, генератор запуска и источник тока накала тиратрона, блок управления и форвакуумный насос с системой коммутации вакуумных линий размещены в отдельной стойке (600*300*700 мм^3).

Ускоритель работает следующим образом (см. рис. 1.3). Источник высокого напряжения (ИВН) заряжает конденсатор первого контура C_0 =10,2 нФ. Блок управления формирует импульс запуска тиратрона, частота подачи управляющих импульсов определяет частоту работы ускорителя f и его мощность на выбранном ускоряющем напряжении. Конденсатор C_0 разряжается на первичную обмотку трансформатора, происходит зарядка конденсатора C_1 =257 пФ с одновременной накачкой током полупроводникового прерывателя тока (два соединенных последовательно диода СДЛ-1600-04) в прямом направлении. По окончании зарядки сердечник трансформатора насыщается и происходит разряд C_1 в контуре с ППТ. При достижении значения тока, близкого к максимуму, ток в контуре прерывается и формируется импульс напряжения, который прикладывается к вакуумному диоду. На многоточечном катоде в тройных точках (металл–диэлектрик–вакуум) происходит поверхностный разряд и из образующейся плазмы идет эмиссия электронов. Электроны ускоряются приложенным напряжением и через фольгу выходят в атмосферу.

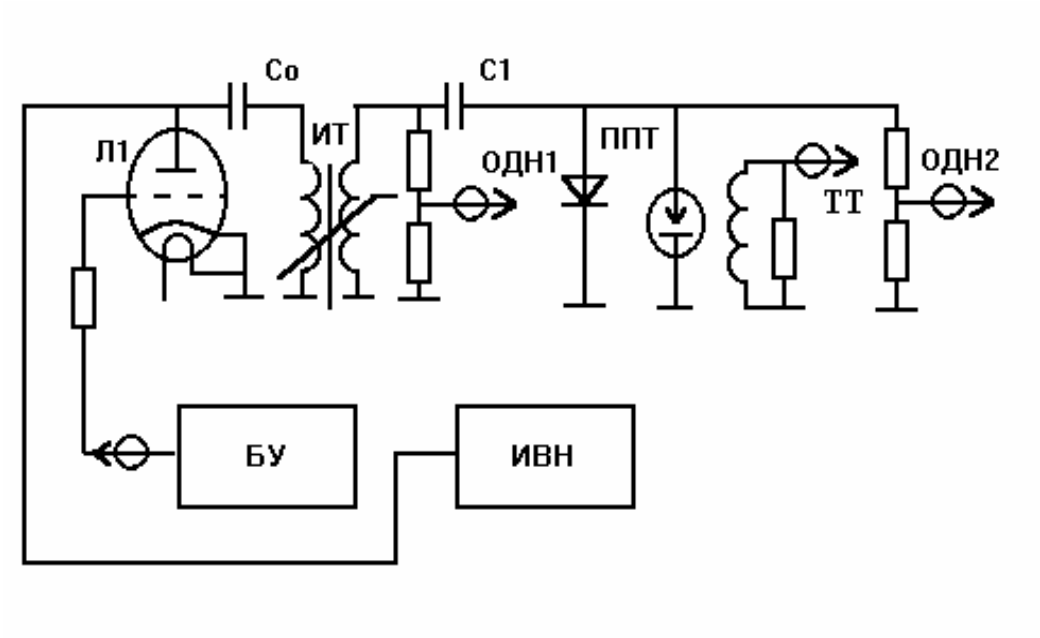


Рис. 1.3. Принципиальная схема ускорителя серии УРТ:
C_0 и C_1 -конденсаторы прямой и обратной накачки, ИТ – импульсный трансформатор, ППТ – полупроводниковый прерыватель тока, ТТ – измерительный трансформатор полного тока диода, ОДН1 и ОДН2 – измерительные омические делители напряжения на конденсаторе обратной накачки и вакуумном диоде, Л1 – тиратрон, БУ – блок управления, ИВН – источник высокого напряжения

Ускоритель имел ускоряющее напряжение до 200 кВ, длительность импульса на полувысоте $t_{имп}$=34 нс и работал с частотой до f=125 Гц . Характерные осциллограммы напряжения на вакуумном диоде, полного тока вакуумного диода и импульса тормозного излучения (с pin–диода СКД 1-02) приведены на рис. 1.4. Также выполнены измерения поглощенной дозы электронного пучка на выходе ускорителя с помощью дозиметрических пленок типа ЦДП -2-Ф2 [1.43]. Детекторы устанавливались в 40 мм от выходной фольги. Для одного из измерений использовался детектор с размером, позволяющим получить полный отпечаток пучка. Для каждого измерения подавалось 1500 импульсов с частотой f=50 Гц. Результаты измерений для катода с размерами 200*20 мм^2 приведены в табл. 2.2 и рис. 2.13. Неравномерность распределения поглощенной дозы по детектору (т. е. плотности тока пучка) не превышает 10% (подробно эти эксперименты рассмотрены в главе 2).

Для проверки электрических измерений методом фильтров (см. главу 7) измерена эффективная энергия электронов E_e, основанная на измерении распределения поглощенной дозы по глубине поглотителя. В качестве фильтра использовалась алюминиевая фольга толщиной x=15 мкм. Плотность тока электронов (j) за фольгой рассчи-

тывалась из измеренной поглощенной дозы D_0 с учетом найденной E_e по формуле (7.9), описанной в главе 7. Результаты расчетов и измеренные значения напряжения на вакуумном диоде U_2 приведены в табл. 1.4. Как видно из полученных данных, электрические и дозиметрические измерения ускоряющего напряжения и эффективной энергии электронов дают результаты, которые отличаются менее чем на 15%, что позволяет говорить о высокой достоверности полученных значений. Кроме того, эксперименты позволяют говорить о том, что принятие величины максимального ускоряющего напряжения за эффективную энергию электронов дает погрешность, допустимую для инженерных расчетов.

Исходя из найденной плотности тока и площади отпечатка пучка на детекторе (30*220 мм^2), можно оценить значение полного тока пучка $I_{по}$, выведенного в атмосферу, а также с помощью выражения (7.8), ток вакуумного диода $I_{п1}$ (толщина фольги 50 мкм): $I_{по}$ = 20,5 А, $I_{п1}$ = 236А соответственно. Полученное значение хорошо согласуется с осциллограммой полного тока (рис.1.5). Исходя из геометрии установки трансформатора он регистрирует ток обратной накачки (зона 1), смену направления тока при обрыве (зона 2), полный ток пучка (зона 3) и колебания тока в контуре (зона 4), возникающие после пробоя вакуумного диода. При применении фольги АБ-50 (50% Al и 50% Be) толщиной 50 мкм выведенный ток $I_{по}$ увеличивается примерно вдвое за счет меньших потерь в фольге.

Таблица 1.4 Результаты измерения и расчета параметров электронного пучка на выходе ускорителя УРТ-0,2

№ серии	D_0, кГр	D_1, кГр	D_0 / D_1	E_e , кэВ	U_2, кВ	j, А/см^2	Условие
1	52,2	24,8	2,1	173	200	0,311	
2	31,3	17,7	1,76	209	200	0,106	Оба детектора укрыты дополнительно фольгой из Al толщиной 15 мкм

Примечание: D_0 - поглощенная доза электронного пучка без фильтра;
D_1 - поглощенная доза электронного пучка после фильтра.

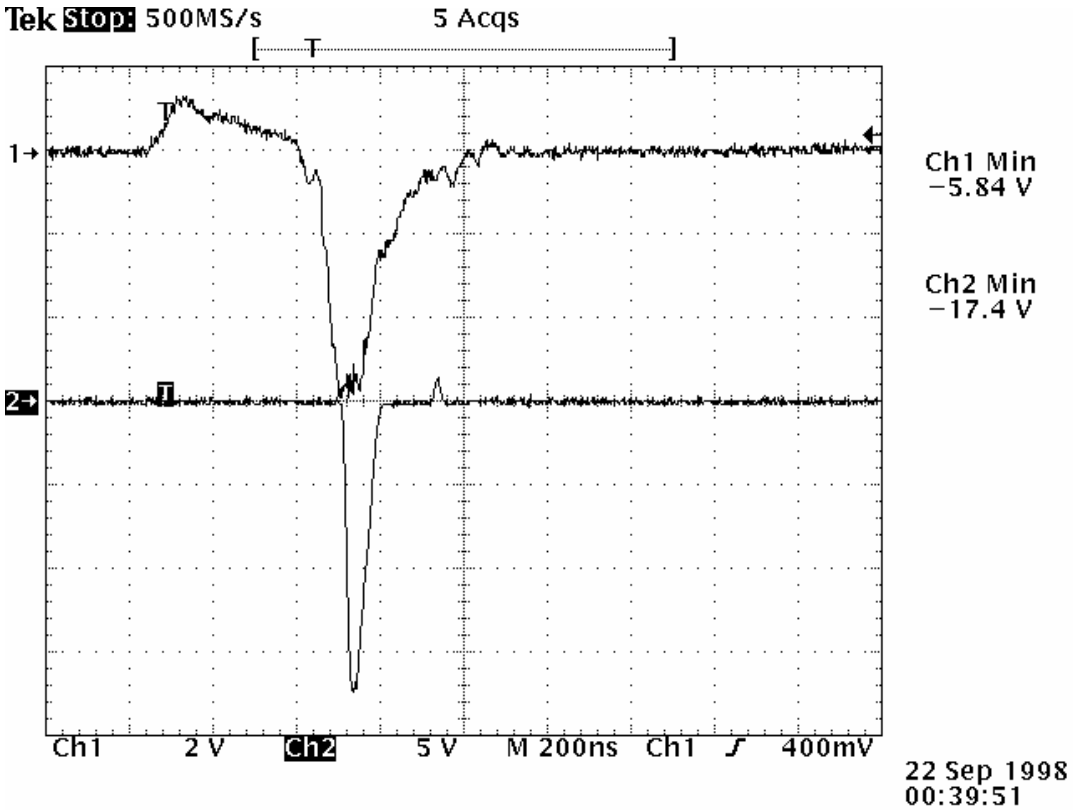


Рис. 1.4. Осциллограммы напряжения на делителе ОДН2 (верхняя, масштаб 70кВ/дел.) и импульса тормозного излучения (временной масштаб 200нс/дел.)

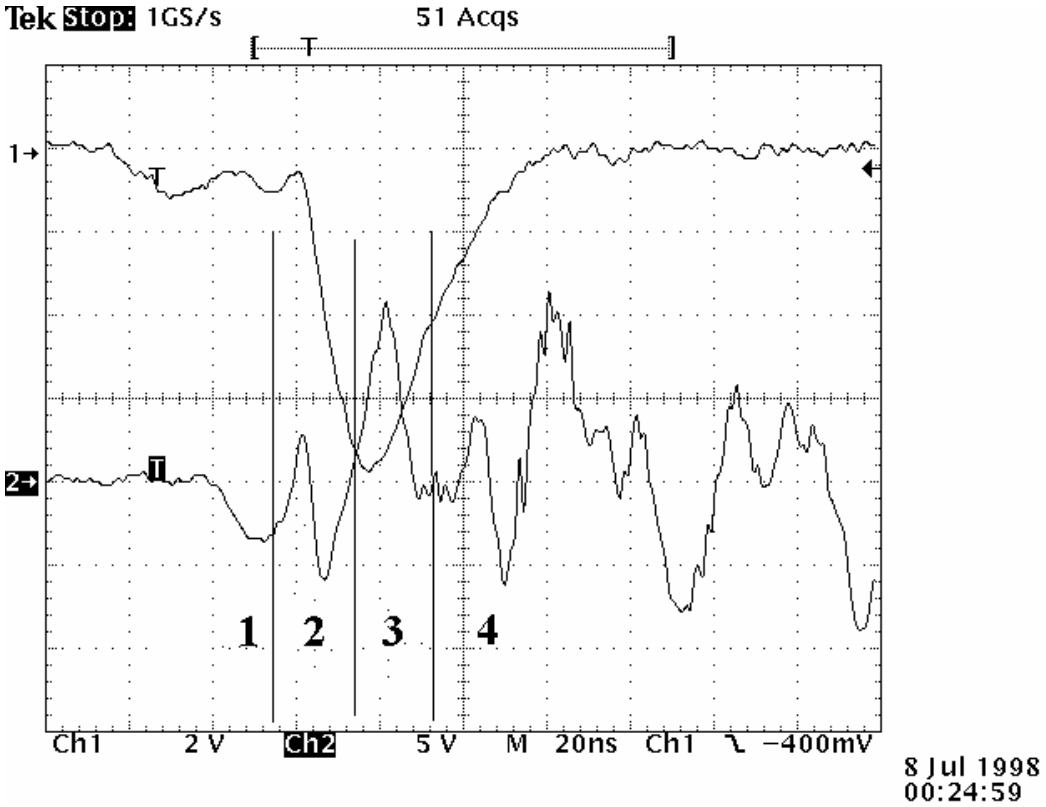


Рис. 1.5. Осциллограммы напряжения на делителе ОДН2 (верхняя, масштаб 50кВ/дел.) и полного тока (масштаб 100 А/дел), временной масштаб 20нс/дел.

Проведены исследования ускорителя в режиме генератора тормозного излучения в целях получения исходных данных для расчета радиационной защиты ускорителя. Для конверсии электронов в тормозное излучение использовалась фольга из тантала толщиной 100 мкм, которая устанавливалась вместо выходной фольги.

Для измерения тормозного излучения использовался прибор ДТУ-01 [1.44] с детекторами из LiF. Детекторы устанавливались на различных расстояниях по оси ускорителя, доза накапливалась за 1 мин при частоте работы f=50 Гц (3 000 импульсов). Результаты измерений приведены в табл. 1.5.

В дальнейшем выполнена проверка устойчивой работы ускорителя при работе на высоких частотах повторения импульсов. По формуле (П.16) выполнен расчет удельных потерь в сердечнике ИТ ускорителя, который показал, что потери энергии в сердечнике (с учетом его массы и частоты перемагничивания) превышают предел теплового режима сердечника уже при частотах ниже 200 Гц, т.е необходимый удельный теплосъем P_c с площади поверхности сердечника превышает рекомендуемую тепловую нагрузку поверхности сердечника (в трансформаторном масле ≤0,25 Вт/см^2 [1.46], линия «предел» на рис. 1.6). Экспериментальная проверка показала, что ускоритель кратковременно (несколько минут) мог работать с предельной частотой до f=200 Гц, а затем происходило снижение выходных параметров из-за перегрева сердечника.

Для устранения причин перегрева и снижения потерь сердечник ИТ был выполнен из трех колец К125*75*10 мм^3 из пермаллоя 50НП толщиной 10 мкм, которые должны обеспечивать запас по частоте работы (см. рис. 1.6). Между кольцами устроен 3 мм зазор для улучшения теплоотдачи. Несмотря на это длительная устойчивая работа ускорителя на частотах 200 Гц и более была невозможна. Анализ позволил установить причину: потери в диодах ППТ, приводящие к их перегреву.

Для уменьшения потерь ППТ был выполнен из двух последовательно включенных SOS-диодов (предоставленных д.т.н. С.Н. Рукиным), каждый на напряжение 100 кВ, которые имеют в 2,5 раза большую рассеиваемую мощность, чем диоды СДЛ-1600-0.4 [1.24]. После доработки ускоритель устойчиво работал на f=200 Гц в течение рабочей смены (рабочую неделю 40 ч), при этом разброс ускоряющего напряжения не превышал 5%. Кратковременно, до 15 мин, ускоритель работал с частотой до f=250Гц. Длительная работа на этой частоте ограничивалась недостаточной мощностью и системой охлаждения имеющегося ИВН.

Таблица 1.5. Результаты измерений тормозного излучения УРТ-0,2

Расстояние от анода, см	Доза за 1 мин., сГр	Доза за импульс, мкГр
0,3	107,35	358
5	21,16	70,5
10	11,72	39
20	3,83	12,8
50	0,668	2,23

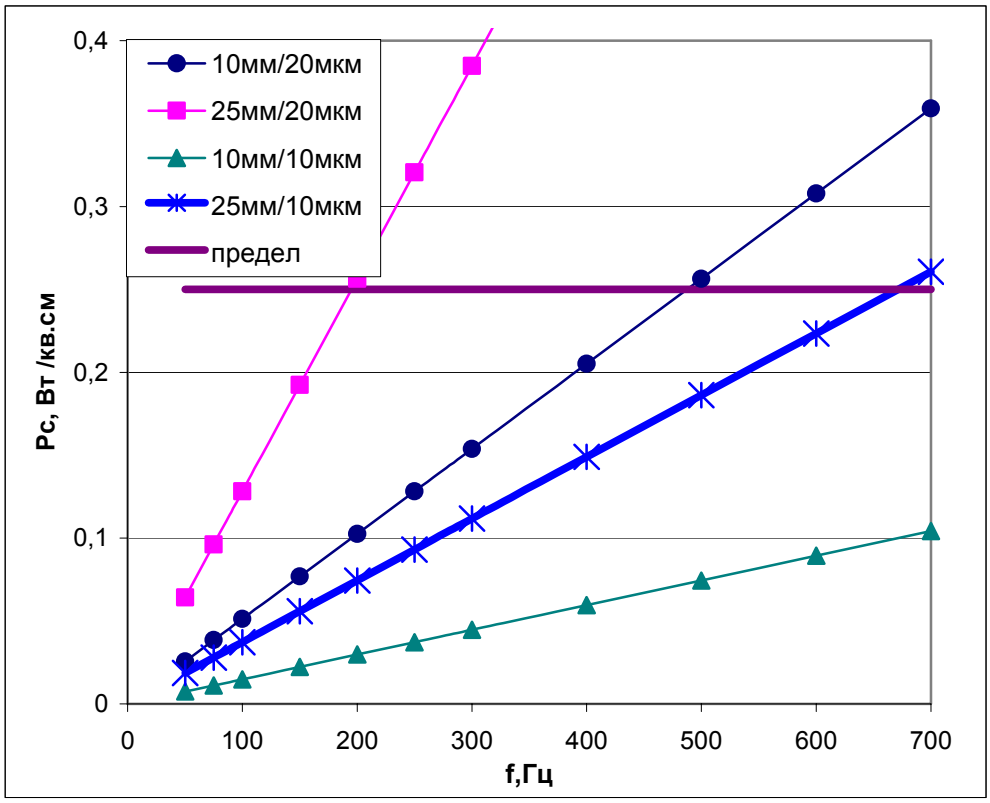


Рис. 1.6. Зависимость требуемого удельного теплосъема P_c с площади поверхности сердечника от частоты работы в сердечнике ИТ ускорителя УРТ-0,2, выполненного из сплава 50НП, для различной ширины (мм) и толщины ленты (мкм)

Таким образом, НУЭ УРТ-0,2 с системой питания по схеме тиратрон–импульсный трансформатор–ППТ позволил проверить работоспособность выбранной схемы (Рис. 1.3). К сожалению, конструкция ускорителя не позволяла изучить влияние параметров контура системы питания НУЭ, прежде всего индуктивности контуров прямой и обратной накачки, на выходные данные и изучить все возможности принятой схемы.

На ускорителе УРТ-0,2 выполнены исследования возможности управления эмиссией в целях получения однородного электронного пучка на катодах большого размера (см. главу 2). Этот ускоритель применялся в радиационных технологиях для пленок толщиной до 0,02 г/см^2, таких как отверждение лакокрасочных покрытий, а также для модификации поверхности полимеров.

1.5.2 Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5

Целью создания ускорителя УРТ-0,5 [1.46] было развитие схемы тиратрон–импульсный трансформатор–ППТ в область больших напряжений для расширения возможных областей применения, создания ускорителя второй группы (см. введение), пригодного для использования в РТ в слоях толщиной до 0,12 г/см^2, таких как модификация пленочных полимеров, радиационная стерилизация, радиационная обработка жидкостей в тонких слоях. В конструкции предусмотрена возможность изучения влияния параметров контура системы питания ускорителя на его выходные характеристики. Имеющиеся в литературе данные по ППТ не позволяют однозначно выполнить расчет ускорителя на заданные параметры, но используя методику расчета, можно получить значения электрических параметров контура и сердечника ИТ, достаточные для конструирования, и существенно снизить трудоемкость пуско-наладочных работ по оптимизации параметров контуров в целях получения максимального ускоряющего напряжения. Кроме того, расчетное значение амплитуды тока и скорости его нарастания в контуре прямой накачки (табл. 1.6) оказались существенно выше, чем допустимые для тиратрона ТГИ1-1000/25 [1.40]. Поэтому величина запаса энергии в конденсаторе C_0 была уменьшена в 1,5 раза.

Принципиальная схема ускорителя осталась той же, что и для УРТ-0,2, изменился состав делителей напряжения (рис. 1.7). Конструкция ускорителя схематично показана на рис. 1.8. Импульсный трансформатор (ИТ) намотан на сердечнике из двух колец К374*305*25 мм^3 из пермаллоя 50НП толщиной 20 мкм. Коэффициент трансформации равен 10, индуктивность рассеяния составляет около 1 мкГ. Емкость конденсаторов контура C_0 =49,3 нФ, C_1 =380 пФ. ППТ состоит из двух параллельных ветвей по четыре диода СДЛ 1600-0.4, включенных последовательно. Схема формирования высоковольтного импульса и вакуумный диод погружены в трансформаторное масло и размещаются в металлическом корпусе диаметром 500 и длиной 900 мм с водяной рубашкой для охлаждения в области ИТ (рис. 1.8, рис.1.9). Источник высокого напряжения (ИВН), собранный по схеме с тиристорным инвертором, преобразует напряжение трехфазной сети 380В в постоянное напряжение до 25 кВ. Управление ускорителем осуществляется дистанционно от блока управления.

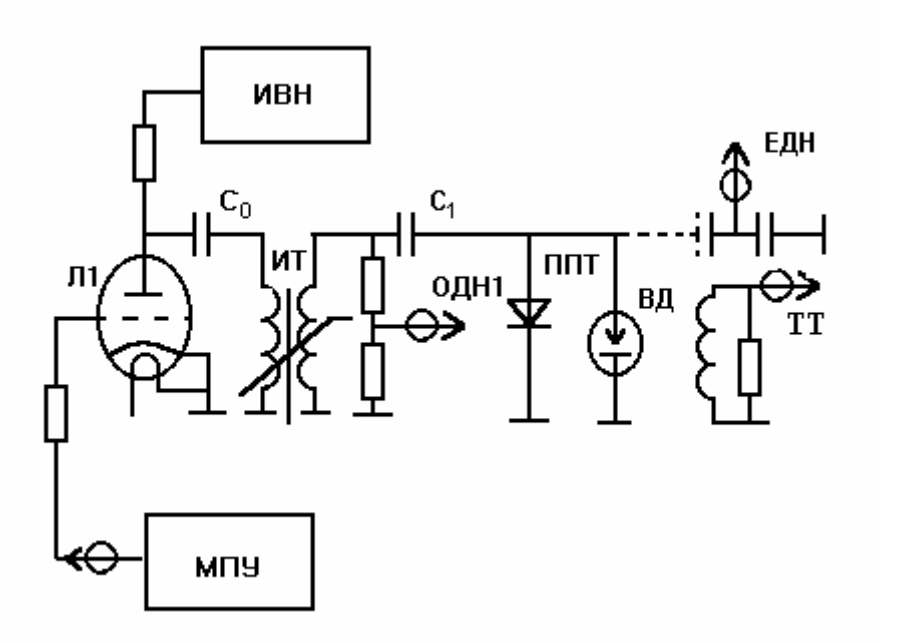


Рис. 1.7. Принципиальная схема ускорителя УРТ-0,5:
C_0 и C_1 -конденсаторы прямой и обратной накачки, ИТ – импульсный трансформатор, ППТ – полупроводниковый прерыватель тока, ТТ – измерительный трансформатор полного тока, ОДН1 и ЕДН – измерительные омический и емкостный делители напряжения на конденсаторе обратной накачки и вакуумном диоде, Л1 – тиратрон, МПУ–местный пульт управления, ИВН – источник высокого напряжения, ВД – вакуумный диод

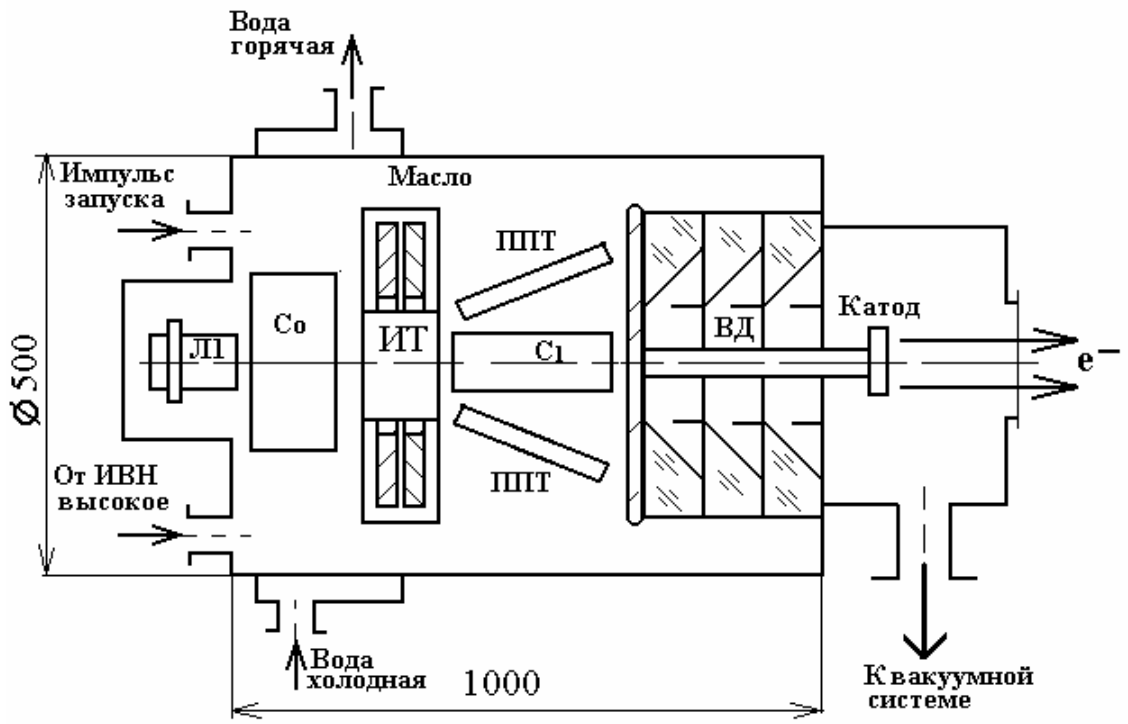


Рис. 1.8. Схема конструкции ускорителя УРТ-0,5
(обозначения см. на рис. 1.7).

Рис. 1.9. Ускоритель УРТ-0,5.

Вакуумный диод ускорителя работал при давлении около 10^{-4} Торр, которое создавалось диффузионным вакуумным агрегатом АВП 100/100. После первых экспериментов вакуумный агрегат был заменен на двухкаскадный вакуумный агрегат АВР-50, который обеспечивал давление в вакуумном диоде около 10^{-3} Торр. Использование этого насоса существенно упростило подготовку ускорителя к работе и одновременно исключило возможность аварии вакуумного насоса при ударной разгерметизации, например при случайном разрыве выходной фольги, что весьма возможно при длительной работе.

Вакуумный изолятор выполнен с экранировкой поверхности диэлектрика [1.41]. Он состоит из шести колец из полиметилметакрилата высотой 3 см. В ускорителе применен МДМ катод [1.42], конструкция которого показана на рис. 2.1. и 2.2.

Для вывода пучка в вакуумном диоде сделано окно диаметром 100 мм. В него устанавливается алюминиевая опорная решетка с прозрачностью 85 %, состоящая из прорезей и ребер шириной 10 и 2 мм, соответственно. На решетку в два слоя укладывается выходная алюминиевая фольга толщиной 15 мкм. По периметру решетки имеется круговой канал для водяного охлаждения. В режиме генератора тормозного излучения для конверсии электронов в тормозное излучение использовалась фольга из тантала толщиной 100 мкм, которая устанавливалась перед выходной фольгой.

Напряжение на формирующей емкости C_1, на вакуумном диоде и ток в нем измерялись с использованием омического (из резисторов ТВО-10) и емкостного делителей напряжения (ОДН-1 и ЕДН) и трансформатора тока ТТ (см. рис.1.7), соответственно. Регистрация сигналов производилась на осциллографе «Tektronix TDS 360». Для измерения мощности поглощенной дозы тормозного излучения (в режиме генератора тормозного излучения) применялся полупроводниковый детектор (pin–диод) СКД1-02. Сигнал с него использовался для контроля появления эмиссии с МДМ–катода как непосредственно связанный с наличием электронного пучка. Устойчивость эмиссии проверялась путем изменения частоты работы ускорителя. Если частота появления сигнала с pin-диода изменялась в соответствии с частотой работы ускорителя, то эмиссия считалась устойчивой.

На ускорителе достигнуты следующие параметры: ускоряющее напряжение до 500 кВ; длительность импульса на полувысоте $t_{имп}$ =50 нс; частота непрерывной работы до f=200 Гц; средняя мощность в электронном пучке до 1 кВт. Характерные осциллограммы тока пучка (I), напряжения на вакуумном диоде (U), импульса тормозного излучения (P) в одном из режимов приведены на рис.1.10. Для контроля электрических измерений, было выполнено измерение эффективной энергии электронов E_e по дозиметрической методике (см. главу 7, [1.39]) и получено хорошее совпадение E_e=486 кэВ с измеренным напряжением на вакуумном диоде U=452 кВ в этом режиме.

Отметим, что параметры ускорителя в одном из режимов измерялись в компании «Chiyoda Technol Corporation» (Токио, Япония), с использованием фирменных детекторов и методики, основанной на построении кривой ослабления в материале детектора фирмы «GEX Corporation» [1.47]. По данным измерений эффективная энергия спектра составляла 441 кэВ, в то время как по результатам электрических измерений ускоряющее напряжение составляло 430 кВ в этом же режиме.

Установлено, что ускоритель устойчиво работает при частоте до 200 Гц, однако при длительной работе (более 30 мин) на частоте более 150 Гц происходит перегревание трансформаторного масла в формирующем элементе, что говорит о недостаточной эффективности охлаждающей системы и требует перехода на проточную систему охлаждения в этих режимах работы. Для более точного расчета радиационной защиты ускорителя измерено распределение поглощенной дозы в режиме генератора тормозного излучения. Детекторы (LiF) устанавливались на различных расстояниях по оси ускорителя. На расстоянии 5 см создается средняя мощность дозы 30,4 Гр/мин. Полученные

данные позволили рассчитать встроенную радиационную защиту для ускорителя (см. главу 5), обеспечивающую защиту персонала, при толщине 40 мм из свинца.

На ускорителе выполнена проверка управления ускоряющим напряжением путем изменения зарядного напряжения от ИВН. Результаты экспериментов показали (см. рис. 1.11), что выходное напряжение изменяется пропорционально (но не линейно) зарядному, а диапазон управления составляет не менее 40%. Отметим, что уменьшение зарядного напряжения ниже 20кВ приводит к выходу ускорителя из режима (резкому непропорциональному уменьшению ускоряющего напряжения), а длительная работа при зарядном напряжении 30кВ вызывает снижение ресурса используемого тиратрона.

Сравнение результатов расчета параметров ускорителя УРТ-0,5 (по методике, приведенной в приложении) и полученных в эксперименте (табл. 1.6) показывает, что полученные значения существенно отличаются от расчетных, особенно по коэффициенту перенапряжения.

Для повышения параметров ускорителя проведено изучение влияния количества параллельных ветвей диодов в ППТ на выходное напряжение ускорителя УРТ-0,5. Результаты экспериментов показали, что увеличение количества параллельных ветвей, т.е. снижение плотности тока при прямой и обратной накачках, приводит не только к некоторому снижению падения напряжения на ППТ в режиме прямой накачки, но и увеличению амплитуды формируемого напряжения (рис. 1.12).

Таким образом, принятое в расчетах в приложении (взято среднее значение диапазона данных J^- из табл. П.5) значение J^- =5 кА/см^2 для диодов типа СДЛ чрезмерно и требует снижения как минимум вдвое. Это явление было несущественно в ускорителе УРТ-0,2, в силу относительно небольшого количества диодов СДЛ, включенных последовательно в одной ветви.

В целях повышения кпд ускорителя и эффективности перемагничивания сердечника ИТ в контур с тиратроном добавлена цепь рекуперации (рис. 1.13), состоящая из диода VD1 (СДЛ-800-0,4) и катушки индуктивности L_p. Эта цепь служит для возврата в накопительную емкость C_0 остаточной энергии, запасенной в индуктивности первого контура после ее разряда, и широко применяется в подобных схемах [1.48]. Индуктивность L_p исключает резкий рост тока через открытый диод, который может привести к его разрушению. Величина индуктивности L_p подбиралась экспериментально. Для этого измерялось зарядное напряжение на накопительной емкости C_0 с использованием емкостного делителя напряжения (использовался только при настройке, на рис.1.13 не показан).

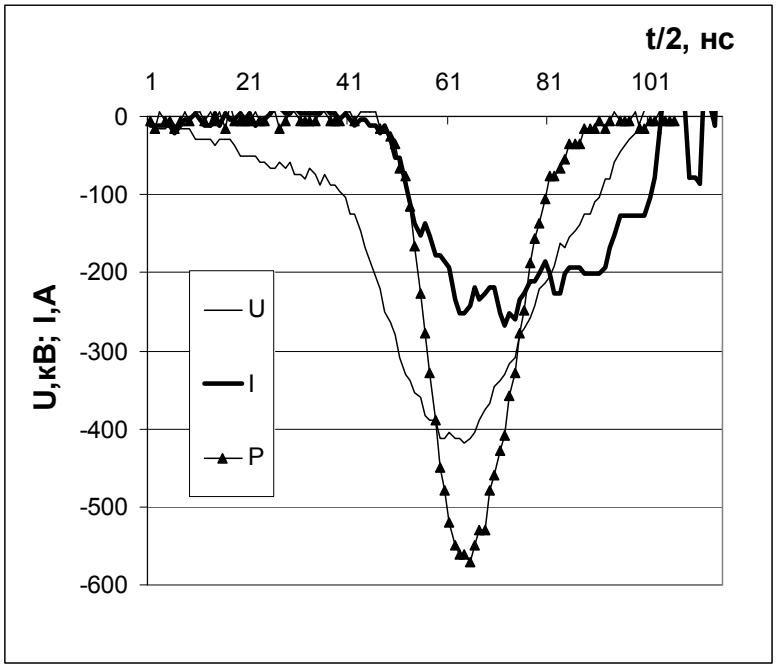


Рис. 1.10 Осциллограммы тока пучка (I), напряжения на вакуумном диоде (U) и импульса тормозного излучения (P) при расстоянии катод-анод d=100 мм

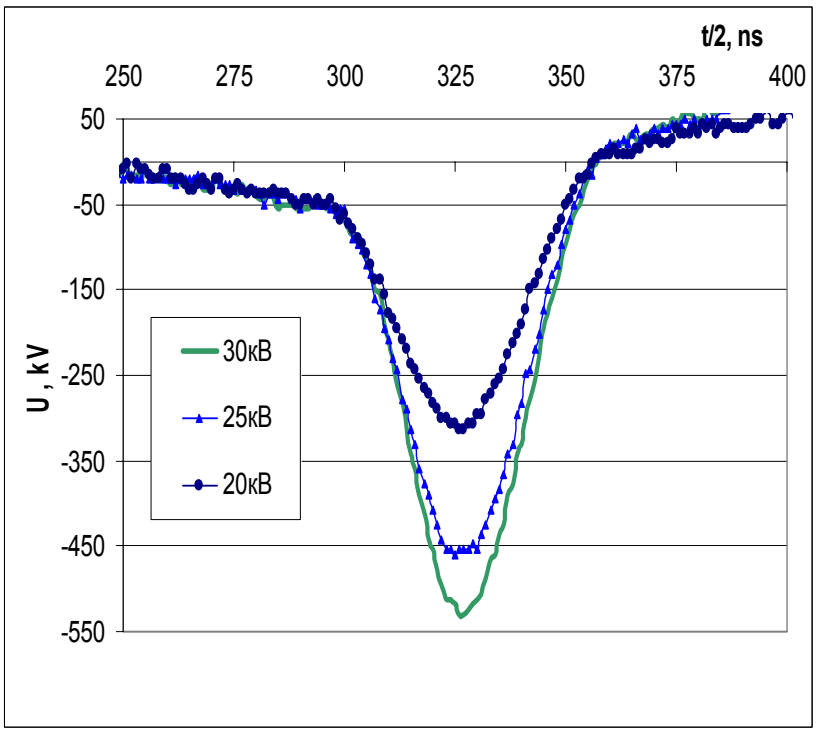


Рис. 1.11. Влияние зарядного напряжения на выходное напряжение ускорителя УРТ-0,5

Установлено, что за счет введения схемы рекуперации потери энергии уменьшились на 10%, при этом значение индуктивности $L_р$=10,2 мкГн. Кроме того, применение схемы рекуперации дало дополнительный эффект увеличения стабильности работы ускорителя, особенно в режиме однократных импульсов. Этот эффект связан со стабилизацией режима перемагничивания сердечника ИТ за счет тока рекуперации.

При настройке ускорителя УРТ-0,5 возникли пробои между верхними витками вторичной обмотки ИТ по поверхности диэлектрического каркаса. Для облегчения режима работы изоляции ИТ в контур с ППТ введен дополнительный соленоид $L_{доп}$ (рис. 1.13). В результате формирующийся наносекундный импульс напряжения распределяется между индуктивностью насыщения ИТ $L_н$ и конструктивной индуктивностью контура обратной накачки $L_к \approx L_{доп}$ (рис. П.1.б). Индуктивность соленоида ($L_{доп}$ =9,3 мкГн) оптимизирована экспериментально (рис. 1.14) по критерию максимума выходного напряжения. Видно, что влияние величины дополнительной индуктивности на ускоряющее напряжение имеет отчетливый максимум, связанный с эффективностью передачи энергии в нагрузку (вакуумный диод).

Одновременно было вдвое уменьшено количество витков обоих обмоток трансформатора (вторичной с 20 до 10, первичной с 2 до 1) для уменьшения общей индуктивности контура обратной накачки. Конструктивно соленоид выполнен 5 витками кабеля РК-50 без оплетки на каркасе диаметром 30см. Модернизированный ускоритель получил индекс УРТ-0,5М.

Как и следовало ожидать, введение $L_{доп}$ привело к существенному изменению параметров контура как прямой, так и обратной накачки ППТ. Сравнение осциллограмм показывает, что введение $L_{доп}$ вызвало уменьшение амплитуд тока прямой и обратной накачки (рис. 1.15), а также напряжения зарядки емкости C_1. Кроме того, вполне объяснимо увеличивается время обратной накачки ППТ и уменьшается амплитуда напряжения на C_1 (измеряемого ОДН) за счет перераспределения напряжения по индуктивностям $L_н$ и $L_к$. При этом, однако, происходит увеличение ускоряющего напряжения при сохранении скорости нарастания и амплитуды тока в вакуумном диоде (рис. 1.16).

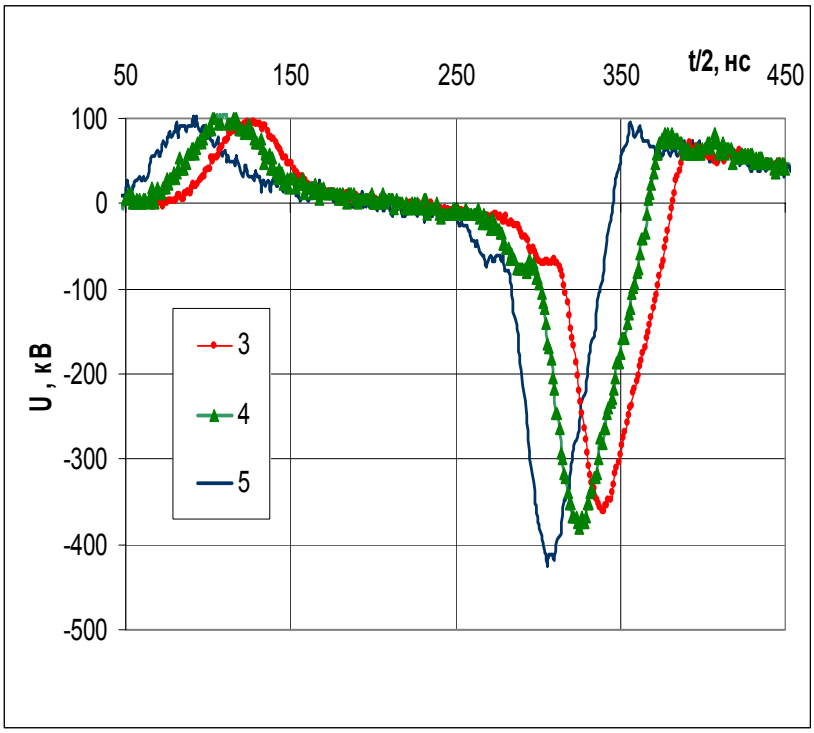


Рис. 1.12. Влияние количества параллельных ветвей диодов СДЛ на выходное напряжение ускорителя УРТ-0,5

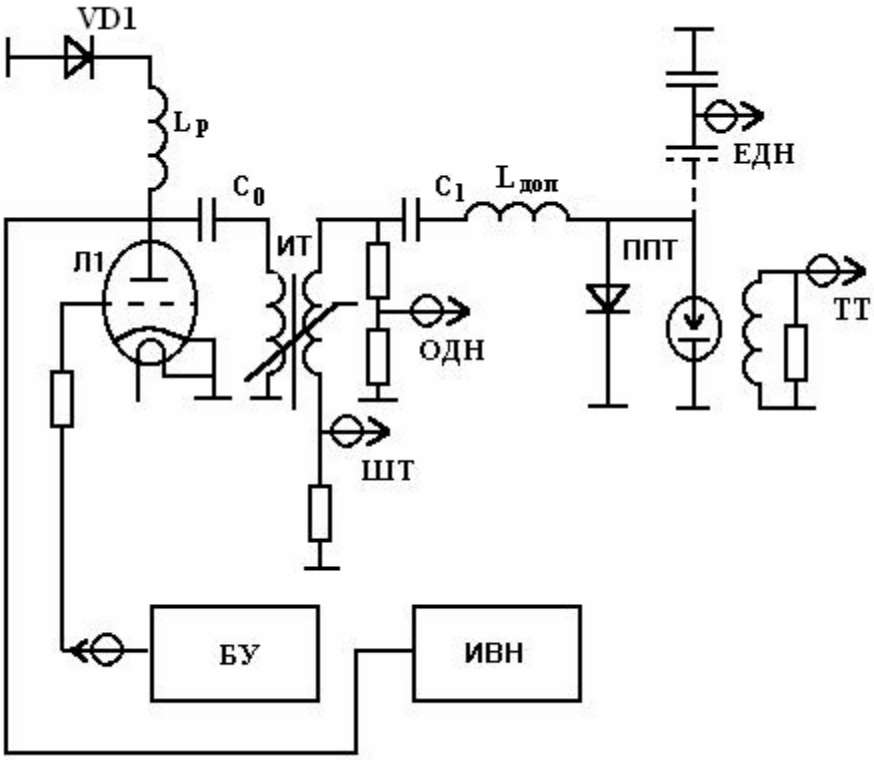


Рис. 1.13. Схема ускорителя УРТ-0,5М

Таблица 1.6. Результаты расчета и экспериментов для ускорителя УРТ-0,5

Параметр	Расчет	Эксперимент	
		УРТ-0,5	УРТ-0,5М
Ускоряющее напряжение $U_у$, кВ	500	414	527
Энергия в импульсе $W_и$, Дж	15	9,38	10,6
Коэффициент перенапряжения $К_п$	1,52	2	2,2
U_{C1}- напряжение на конденсаторе C_1, кВ	273	250	240
Емкость конденсатора C_1, нФ	0,576	0,386	0,442
Время обратной накачки $t_{об}$, нс	70	60	122
Индуктивности контура обратной накачки L_1, мкГн	3,45	3,78	13,7
Волновое сопротивление контура обратной накачки, Ом	77,4	99	175,8
Амплитуда тока в контуре обратной накачки I_1, кА	3,3	2,1/2,75*	1,1/1,36*
Плотность тока в контуре обратной накачки J^-, кА/см^2	16,14	13,79	6.8,
Энергии в конденсаторе прямой накачки W_{C0}, Дж	21,6	25,79	25,79
Рабочее напряжение тиратрона, кВ	25	30**	30**
Емкость конденсатора C_0, нФ	69,1	57,3	57,3
Индуктивности контура прямой накачки $L_К$, мкГн	1,5	1,5	10,5
Время прямой накачки $t_{пр}$, нс	715	404/651*	342/1720*
Волновое сопротивление контура прямой накачки, Ом	6,59	7,24	19,1
Амплитуда тока в контуре прямой накачки I_0, А	379	403/414*	143/157*
Рабочее напряжение используемых диодов $U_д$, кВ	125	125	125
Количество диодов в цепи $N_{пд}$	4	4	4
Плотность тока в контуре прямой накачки J+, кА/см^2	2,07	1,9	0,78
Площадь диода $S_д$, см^2	0,2	0,2	0,2
Количество параллельных цепей $N_{пц}$	3	4	5
Рабочая плотность обратного тока, кА/см^2	5,38	3,44	1,365
Заряд обратной накачки $t_{об}$ * I_1, мкКл	226	126	137
Заряд прямой накачки $t_{пр}$ * I_0, мкКл	271	163	135
Отношение амплитуд токов I_1/I_0	8,51	5,22	8,7
Коэффициент умножения ИТ	10	10	10

** -Расчетные значения;*

*** Напряжение в экспериментах увеличено для компенсации потерь энергии в сердечнике ИТ.*

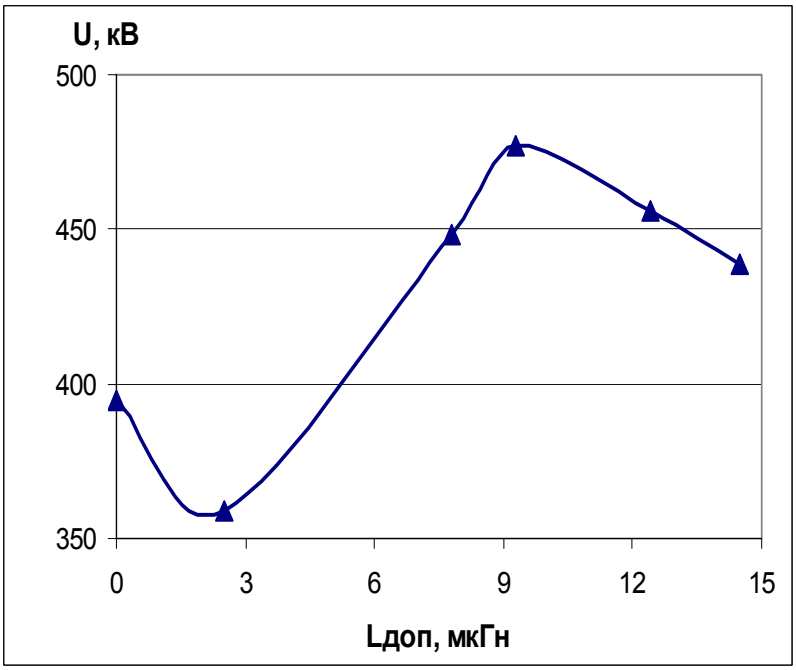


Рис. 1.14. Влияние величины дополнительной индуктивности на ускоряющее напряжение

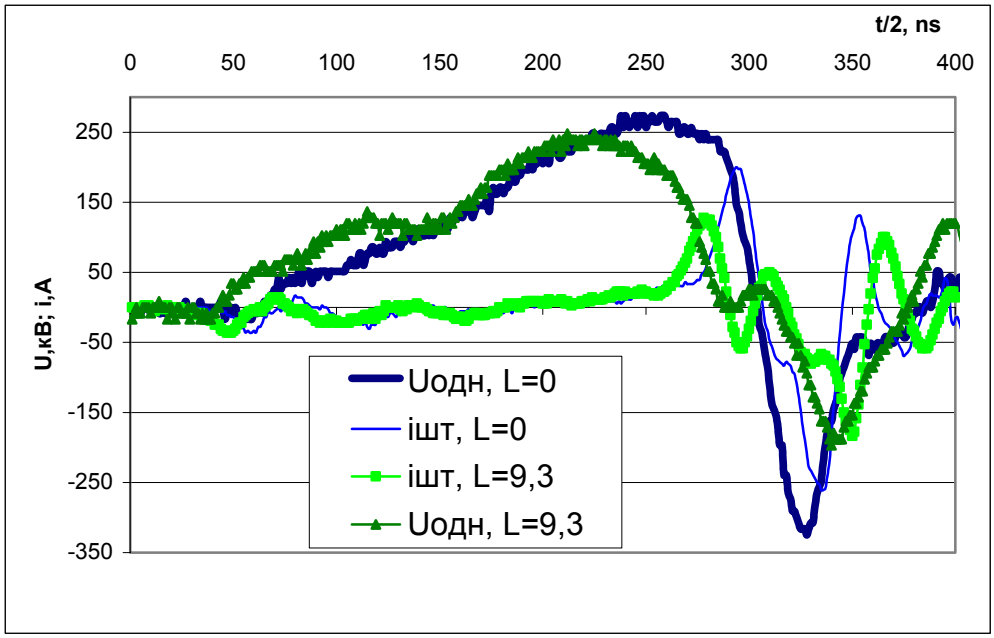


Рис. 1.15. Осциллограммы напряжения с ОДН и тока с шунта тока (ШТ) для случаев наличия и отсутствия $L_{доп}$ (в мкГн).

Сравнение результатов расчета и полученных в эксперименте для ускорителей УРТ-0,5 и УРТ-0,5М показывает (см. табл. 1.6) увеличение коэффициента перенапряжения, несмотря на существенное уменьшение амплитуд и плотностей тока при прямой и обратной накачке ППТ. Однако для ускорителя УРТ-0,5М создано более высокое соотношение амплитуд токов прямой и обратной накачки и более строгое соблюдение равенства зарядов. Наиболее возможное объяснение положительного эффекта от введения в контур $L_{доп}$ – лучшее согласование работы системы питания ускорителя с вакуумным диодом за счет увеличения волнового сопротивления контура обратной накачки.

Увеличение амплитуды импульсов ускоряющего напряжения подтверждено измерениями распределения поглощенной дозы электронного пучка в алюминии, проводившимися с помощью дозиметрических пленок типа ЦДП-2-Ф2 [1.43], которые показали значительное увеличение проникающей способности электронов (рис. 1.17). Детекторы устанавливались на расстоянии 5 см от выходного окна вакуумного диода за слоями алюминиевой фольги различной толщины. Измерения проводились по 100 импульсам, которые подавались с частотой 1 Гц.

Ускорители УРТ-0,5 и УРТ-0,5М могут быть использованы в радиационных технологиях в слоях толщиной до 0,12 г/см^2, таких как модификация пленочных полимеров, радиационная стерилизация, радиационная обработка жидкостей в тонких слоях (см. главы 4-6).

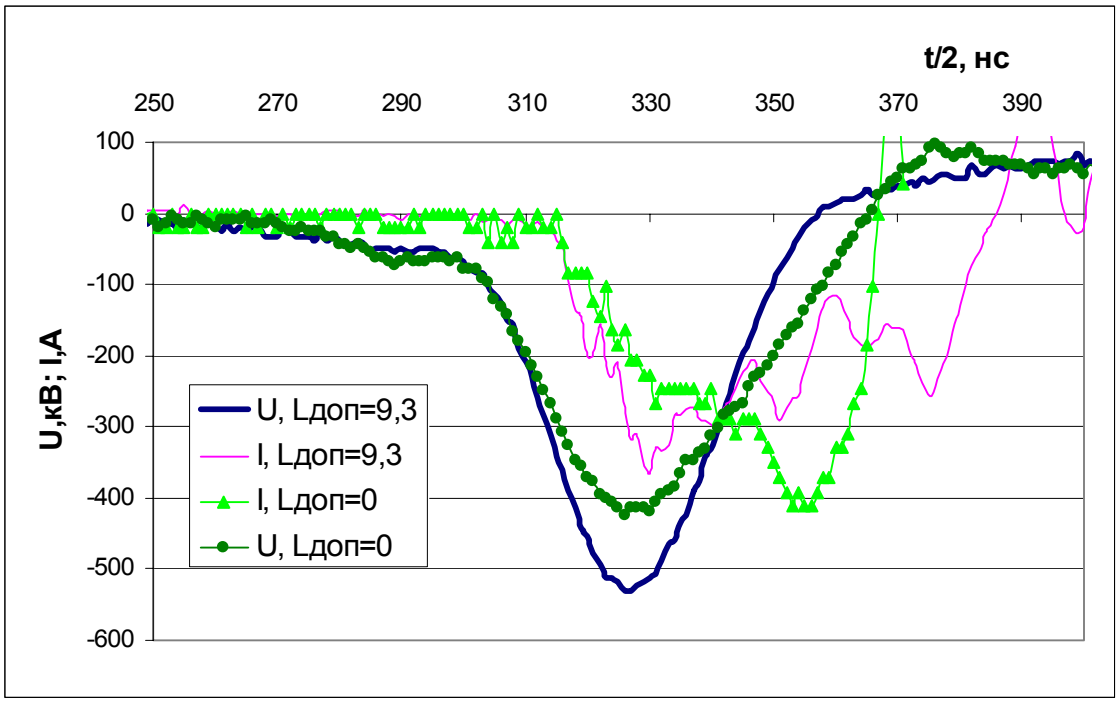


Рис. 1.16. Осциллограммы напряжения с ЕДН и тока в вакуумном диоде для случаев наличия и отсутствия $L_{доп}$, мкГн

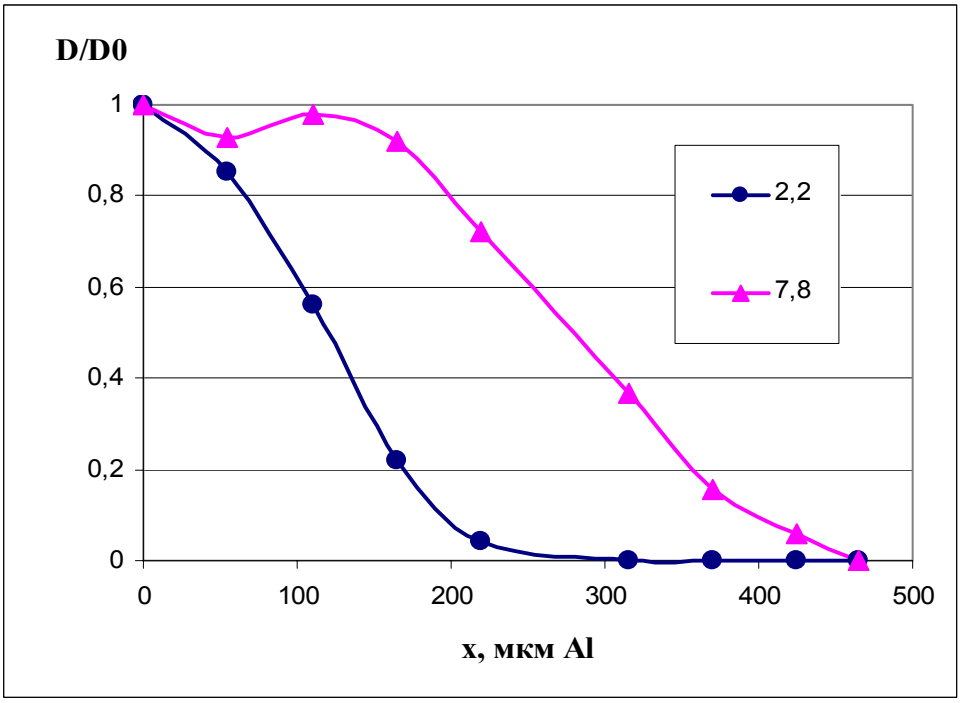


Рис. 1.17. Кривые ослабления пучка электронов при разных величинах индуктивности $L_{доп}$, мкГн

1.5.3 Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-1

Целью разработки ускорителя УРТ-1 [1.49] было развитие схемы тиратрон–импульсный трансформатор–ППТ в область больших напряжений для расширения возможных областей применения, создания ускорителя третьей группы (см. введение В.4) пригодного для использования в РТ в слоях толщиной до 0,4 г/см^2, таких как радиационная обработка жидких и сыпучих веществ в потоке (прежде всего пищевых), радиационная стерилизация объектов повышенной толщины (медицинских бинтов, одноразового белья), либо в специальной упаковке (стеклянной или из алюминиевой фольги).

Как показано выше, имеющиеся данные по расчету схем питания ускорителей с ППТ не позволяют выполнить точный расчет на заданные параметры, что вызывает потребность в экспериментальной оптимизации параметров элементов схемы.

Принципиальная схема ускорителя УРТ-1 (см. рис. 1.13) не отличается от ускорителя УРТ-0,5М. Индуктивность дополнительного соленоида ($L_{доп}$=6,4 мкГн) оптимизирована экспериментально (рис. 1.18), также как и для УРТ-0,5М.

Импульсный трансформатор намотан на сердечнике из трех колец К650*470*25 мм^3 из пермалоя 50НП толщиной 20 мкм. Между кольцами выполнен зазор 3 мм для охлаждения. Коэффициент трансформации равен 10, индуктивность рассеяния составляет L_s=0,8 мкГ. Обмотки выполнены из медной ленты толщиной 0,5 мм: вторичная из ленты шириной 30 мм, а первичная – 50 мм. Первичная обмотка перекрывает примерно 1/3 вторичной, которая намотана на каркас из оргстекла. Изоляционные промежутки сердечник–обмотка и между обмотками составляют 25 мм. Для эффективного перемагничивания сердечника импульсного трансформатора используется схема рекуперации, состоящая из диода VD1 (СДЛК 0,4/125) и катушки индуктивности (L_p=20 мкГн, см. рис. 1.13).

Емкость конденсатора первого контура составляет C_0 =84,1 нФ, конструктивно она выполнена в виде 15 параллельных секций по два включенных последовательно конденсатора К15-10-40кВ–0,01мкФ. Емкость конденсатора второго контура составляет C_1 =650 пФ, конструктивно она состоит из четырех параллельных секций по 28 включенных последовательно конденсаторов КВИ-3-12кВ–6800пФ.

Использование в первом контуре конденсаторов типа К15-10 позволило существенно сократить габариты, однако ввело ограничение по допустимой частоте работы ускорителя. Данный компромисс, на наш взгляд, оправдан тем, что уже при 50 Гц средняя мощность ускорителя P_c ≈3 кВт становится вполне достаточной для многих

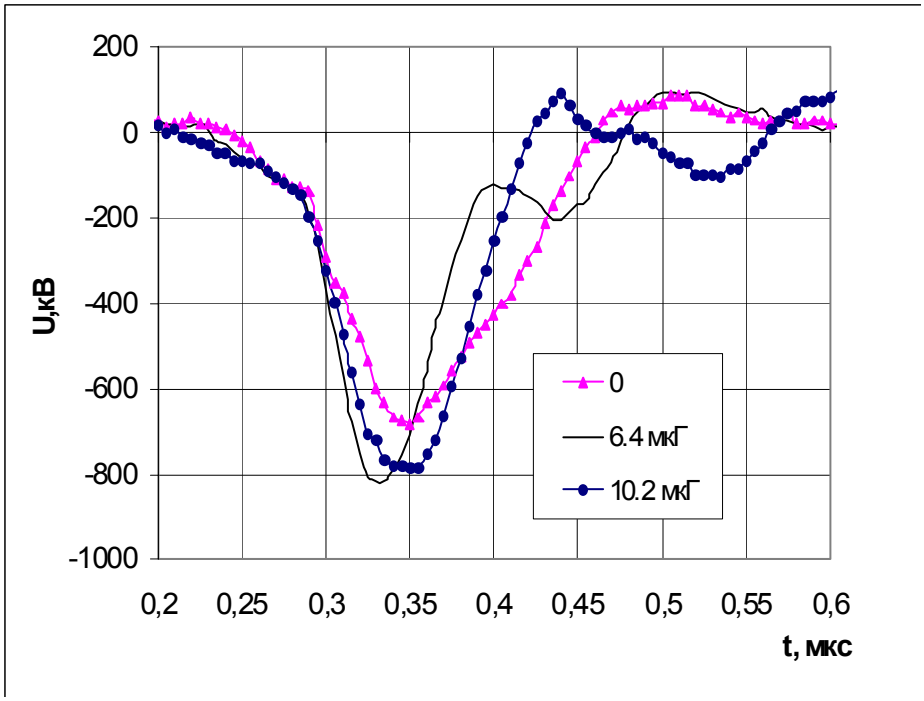


Рис. 1.18. Напряжение на вакуумном диоде при различных значениях индуктивности $L_{доп}$

Рис. 1.19. Ускоритель УРТ-1

приложений. Для коммутации использовался тиратрон Л1 с холодным катодом ТП2-10к/50 [1.57], работающий в режиме с заземленным катодом.

ППТ конструктивно состоит из четырех параллельных ветвей по семь диодов СДЛК 0,4/125, включенных последовательно. Схема формирования высоковольтного импульса и вакуумный диод погружены в трансформаторное масло и размещаются в металлическом корпусе квадратного сечения (сторона 900 мм) высотой 1300 мм с водяной рубашкой в верхней части для охлаждения. Источник высокого напряжения (ИВН) преобразует напряжение сети 220В в регулируемое постоянное напряжение до 50 кВ. Управление ускорителем осуществляется дистанционно от блока управления.

Вакуумный диод ускорителя работает при давлении около 10^{-4} торр, которое создается диффузионным вакуумным насосом Н-100. Вакуумный изолятор выполнен с экранировкой поверхности диэлектрика [1.41]. В вакуумном диоде ускорителя применялись МДМ [1.42] и МК–катоды [1.50]. Для вывода пучка вакуумный диод имеет выпускное окно диаметром 170 мм. Оно имеет алюминиевую решетку с прозрачностью 85 %, состоящую из прорезей и ребер шириной 10 и 2 мм соответственно. На решетку укладывается выходная алюминиевая фольга толщиной 15 мкм в два слоя. В решетке имеется канал для водяного охлаждения. В режиме генератора тормозного излучения для конверсии электронов в тормозное излучение использовалась фольга из тантала толщиной 300 мкм, которая устанавливалась перед выходной фольгой.

Напряжение на формирующей емкости C_1 и напряжение на вакуумном диоде измерялись с использованием омического и емкостного делителей напряжения соответственно. Ток в последнем контуре и ток пучка электронов на выходе из вакуумного диода измерялись с помощью низкоиндуктивного шунта (из нержавеющей фольги) и трансформатора тока в анодном фланце. Электрические импульсы регистрировались на цифровом осциллографе «Tektronix TDS 360».

Для измерения мощности поглощенной дозы тормозного излучения в режиме генератора тормозного излучения (танталовая мишень толщиной 0,3 мм) применялся полупроводниковый детектор СКД1-02 с блоком разделительных конденсаторов СБР-21, который устанавливался на расстоянии 170 мм. Ускоритель показан на рис.1.19. На ускорителе достигнуты следующие параметры: ускоряющее напряжение до 900 кВ; длительность импульса тока на полувысоте $t_{имп}$ =50 нс; частота непрерывной работы до f=50 Гц. Характерные осциллограммы тока пучка и напряжения на вакуумном диоде при расстоянии анод–катод d=90 мм приведены на рис.1.20.

Для проверки электрических измерений использовалась дозиметрическая методика [1.35]. На рис. 1.21 приведены измеренные данные для ускорителей УРТ-0,5 и УРТ-1. Расчеты по дозиметрической методике (табл. 1.7) показывают несколько большее значение энергии электронов (0,9-1 МэВ), чем электрические измерения, в пределах 10%-ной погрешности.

Измерения поглощенной дозы электронного пучка на выходе ускорителя проводились с помощью дозиметрических пленок типа ЦДП -2-Ф2 [1.43]. Детекторы устанавливались вплотную к выходной фольге. Размер детектора позволял получить полный отпечаток пучка. Измерение проводилось по 20 импульсам (использовался МДМ–катод), подаваемым с частотой f=1 Гц. Результаты обработки показаний детекторов на микрофотометре позволили получить распределение плотности тока на аноде ускорителя УРТ-1 (по оси симметрии анода и параллельно ей, в 10 мм от оси), которое имеет, как видно из рис.1.22, существенную неоднородность, возрастая от периферии к центру пучка электронов.

Таким образом, созданный наносекундный ускоритель электронов подтвердил работоспособность выбранной схемы в области высоких напряжений. Этот ускоритель может быть использован в радиационных технологиях в слоях толщиной до 0,4 г/см^2, таких как радиационная стерилизация, радиационная обработка жидких и сыпучих веществ в потоке.

Таблица 1.7. Результаты расчетов по дозиметрической методике

№ п.п.	Полная толщина алюминиевого поглотителя, мкм	Толщина алюминиевого поглотителя между детекторами, мкм	D_0/D_1	Расчетное значение энергии электронов, МэВ
1	55	55	1,304	0,89
2	110	55	1,228	1,0
3	165	55	1,22	1,02

Примечание: D_0 - поглощенная доза электронного пучка без поглотителя;
D_1 - поглощенная доза электронного пучка после поглотителя.

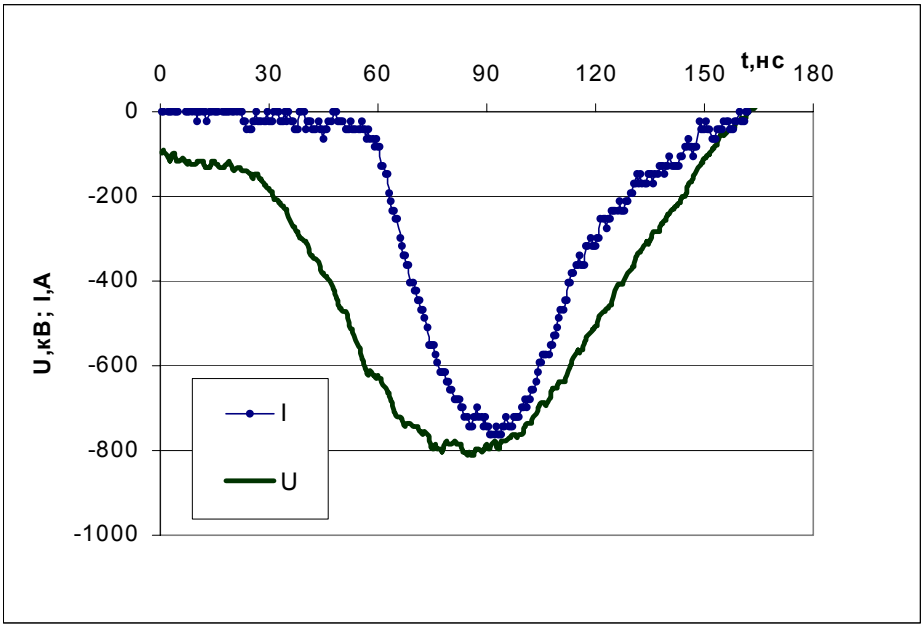


Рис.1.20. Осциллограммы тока пучка (I) и напряжения на вакуумном диоде (U) при расстоянии анод–катод d=90 мм

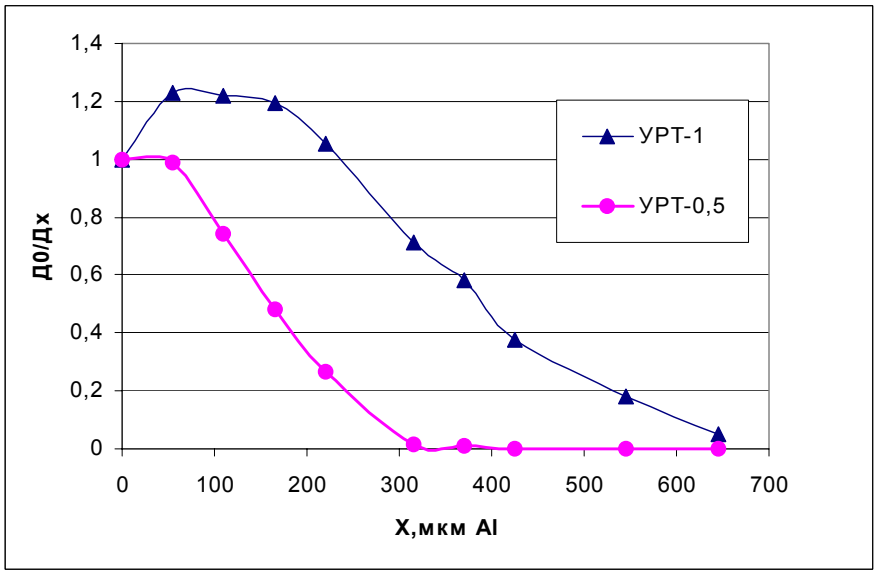


Рис.1.21. Распределение поглощенной дозы в Al для ускорителей УРТ-0,5 и УРТ-1, До и Дх – дозы на поверхности и на глубине x, соответственно

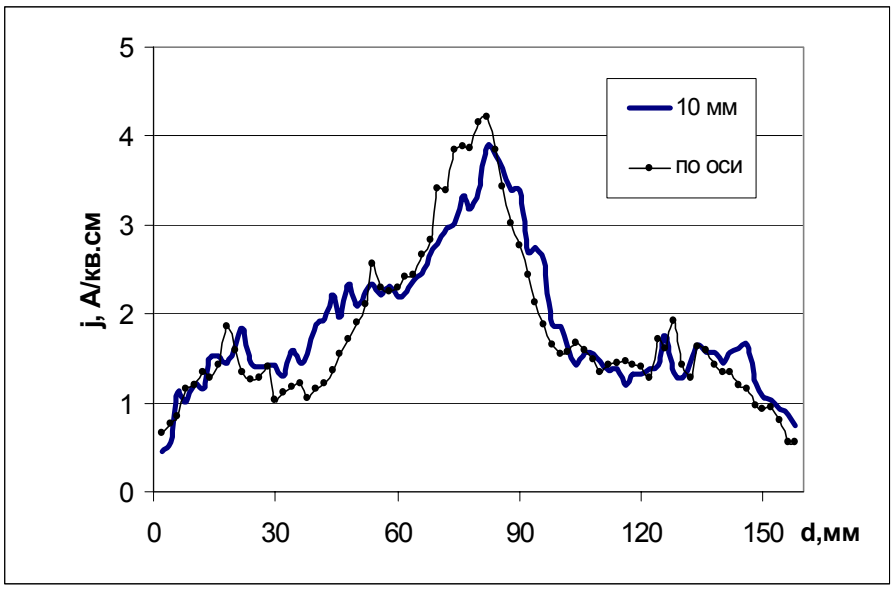


Рис.1.22. Распределение плотности тока j на аноде ускорителя УРТ-1
(по оси симметрии анода и параллельно ей, в 10 мм от оси)

1.6. Вакуумный диод для двухстороннего облучения

1.6.1. Введение

При использовании ускорителя заряженных частиц наиболее выгодно выполнять облучение изделий с двух сторон, что позволяет снизить неоднородность облучения и увеличить толщину облучаемого изделия [1.51] при более однородном распределении поглощенной дозы по толщине.

Как правило, при использовании ускорителей заряженных частиц , в том числе и электронов, двухстороннее облучение объектов достигается либо посредством использования двух ускорителей, либо специальной системы развертки пучка [1.5]. Однако подобные решения требуют использования двух ускорителей, что дорого, либо неприменимы к наносекундным пучкам из-за сложности создания системы их развертки. Известно также решение, заключающееся в использовании одного генератора импульсного высокого напряжения и двух отпаянных наносекундных трубок [1.52], размещаемых с разных сторон. Но данная конструкция

- применима только для импульсов с параметрами (амплитуда, длительность, частота повторения), сформированных под существующие типы трубок;
- приводит к существенной паразитной емкости высоковольтного разветвителя за счет использования жидкой изоляции высоковольтного электрода, что снижает амплитуду ускоряющего напряжения;
- не позволяет получать пучки большой площади;
- не позволяет задать алгоритм облучения по каждой из сторон.

Поэтому была поставлена задача создания вакуумного диода для двухстороннего облучения объектов, причем с возможностью задания алгоритма облучения по каждой из сторон.

1.6.2. Описание установки и методики экспериментов

Найденное решение задачи состояло в использовании вакуумного диода с двумя промежутками катод-анод. Техническая реализация этого решения состояло в следующем: к общему катододержателю подсоединялось два дополнительных плеча, позволяющих разместить на концах напротив друг друга два катода, а корпус вакуумного диода содержал два окна-анода друг напротив друга для вывода пучков электронов в воздух для облучения объектов (рис.1.23), размещенных между катодами.

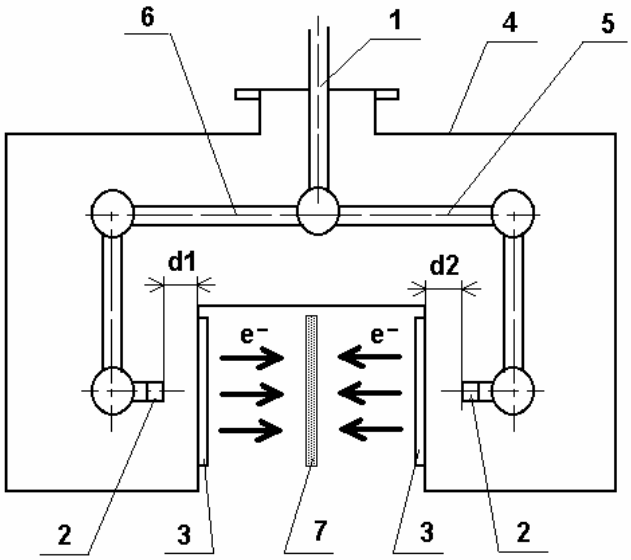


Рис.1.23. Схема вакуумного диода для двухстороннего облучения:
1 - общий катододержатель, 2 - катоды, 3- окна для вывода пучка, 4 – корпус, левое -5 и правое -6 плечи катододержателя, облучаемый объект -7.

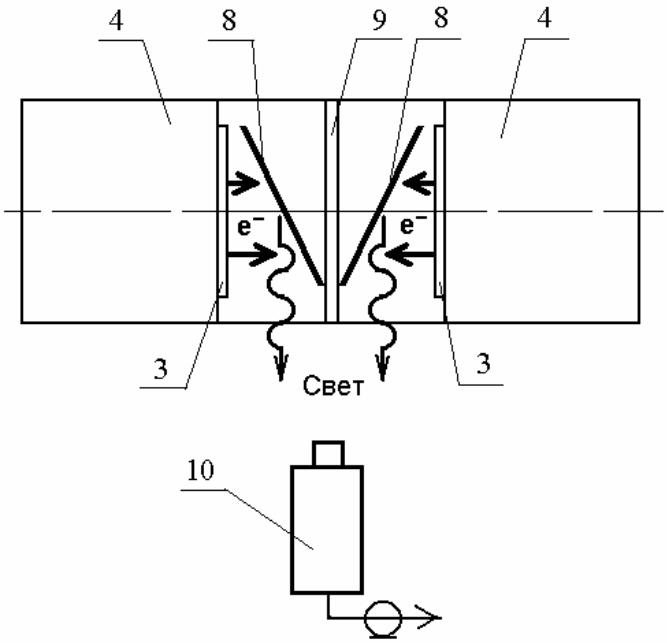


Рис.1.24. Оптическая схема (вид снизу):
3- окна для вывода пучка, 4 – корпус, 8 - люминофоры, 9 – непрозрачный экран,10 - телекамера.

Работа вакуумного диода для двухстороннего облучения экспериментально проверена на ускорителе УРТ-0,5 [1.46].

К выходному фланцу вакуумного диода ускорителя УРТ-0,5, вместо анодного фланца, была присоединена специальная насадка (см. рис.1.23). Окна-аноды для вывода пучка имели диаметр 100 мм. Каждое окно имеет алюминиевую решетку с прозрачностью 85 %, состоящую из прорезей и ребер шириной 10 и 2 мм, соответственно. На решетку укладывается выходная алюминиевая фольга толщиной 15 мкм в два слоя. В решетке имеется канал для водяного охлаждения. Левое и правое плечи – держатели катодов, выполнены из дюралюминиевых прутков диаметром 40 мм. Их конструкция позволяет независимо изменять оба расстояния катод–анод (d1, d2). Крепление плеч к общему катододержателю выполнено так, чтобы имелась возможность осуществлять центровку катодов в выводных окнах независимо в каждом диоде. В экспериментах применялись металлодиэлектрические катоды, по конструкции аналогичные использованному в [1.46], но большего диаметра (40 мм, см. Главу 2).

Вакуумный диод ускорителя работает при давлении около 10^{-3} торр, которое создается ротационным вакуумным агрегатом АВР-50. В экспериментах использовались штатные электрические датчики ускорителя УРТ-0,5М, позволяющие измерять напряжение на вакуумном диоде и ток в общем катододержателе.

Для исследования срабатывания или несрабатывания левого и правого катодов в течении одного импульса ускоряющего напряжения использовалась оптическая схема (рис. 1.24), состоящая из люминофоров 8, непрозрачного экрана 9 и телекамеры 10. Сигнал с телекамеры VBC-701 вводился в персональный компьютер и обрабатывался программой OSC-16. Суть люминесцентно-телевизионной методики сводится к тому, что если пучки электронов генерируются обоими катодами одновременно, то свечение от обоих люминофоров попадает в один кадр телесигнала, если ускоритель работает на частоте, существенно меньшей, чем телекамера (50 Гц). При несрабатывании одного из диодов, соответствующая часть кадра будет пустой. Для измерения количественных различий излучения при работе левого и правого катодов использовался дозиметрический метод. Измерения поглощенной дозы электронного пучка на выходе обоих выходных окон проводились с помощью дозиметрических пленок типа ЦДП -2-Ф2 [1.43], которые устанавливались вплотную к выходной фольге. Размер пленки позволял получить полный отпечаток пучка.

Измерение проводилось по 10 импульсам, подаваемым с частотой f=1 Гц. Кроме того, детекторы размещались за слоями алюминиевой фольги различной толщины, что позволяло измерять распределение поглощенной дозы в материале.

Вакуумный диод для двухстороннего облучения работает следующим образом. Формируется импульс высокого напряжения и одновременно прикладывается (см. рис.1.23) через катододержатель 1 и плечи 5,6 к катодам 2. На поверхности МДМ–катода появляется электрическое поле. Эмитирующая плазма возникает вследствие разряда в тройных точках метал–диэлектрик–вакуум. Плазма обеспечивает необходимую эмиссию электронов, которые ускоряются приложенным электрическим полем и через выходные окна 3 выводятся в атмосферу для облучения образца 7.

1.6.3. Результаты экспериментов и выводы

На первом этапе были выбраны равные расстояния катод–анод d1=d2=90мм. Характерные осциллограммы тока пучка и напряжения на вакуумном диоде для двухстороннего диода были подобны осциллограммам, полученным на ускорителе УРТ-0,5 с одним диодом (рис.1.25) при равных зарядных напряжениях.

Свечение люминофоров от электронных пучков было без пропусков и близким по интенсивности (рис.1.26б). Для проверки люминесцентно-телевизионной методики выполнены измерения без левого катода (рис. 1.26в), которые показали возможность четкой регистрации отсутствия свечения одного из люминофоров (рис. 1.26в). Результаты дозиметрии (табл. 1.8) показывают, что в пределах погрешности измерений (15%) оба катода работают одинаково (см. табл. 1.8, №1 и 4).

Исследовано влияние на работу вакуумного диода расстояний d1 и d2, которые уменьшались как одновременно, так и независимо друг от друга. Установлено, что уменьшение расстояния в одном из диодов не приводит к перераспределению тока между диодами, а одновременность срабатывания диодов не нарушается. При этом видно, что значения поглощенных доз на анодах (см. табл. 1.8) возрастают тем сильнее, чем меньше d2. Однако это вызвано геометрическим фактором, связанным с уменьшением диаметра пучка, которое приводит к увеличению плотности тока на аноде, которой прямо пропорциональна поглощенная доза. При равных расстояниях катод–анод отпечатки пучков практически одинаковы (рис.1.27).

Измерения распределения поглощенной дозы в алюминии показали незначительное (~10%) снижение проникающей способности электронов при d1=d2 =90 мм по сравнению с данными для ускорителя УРТ-0,5 с одним диодом (рис. 1.28).

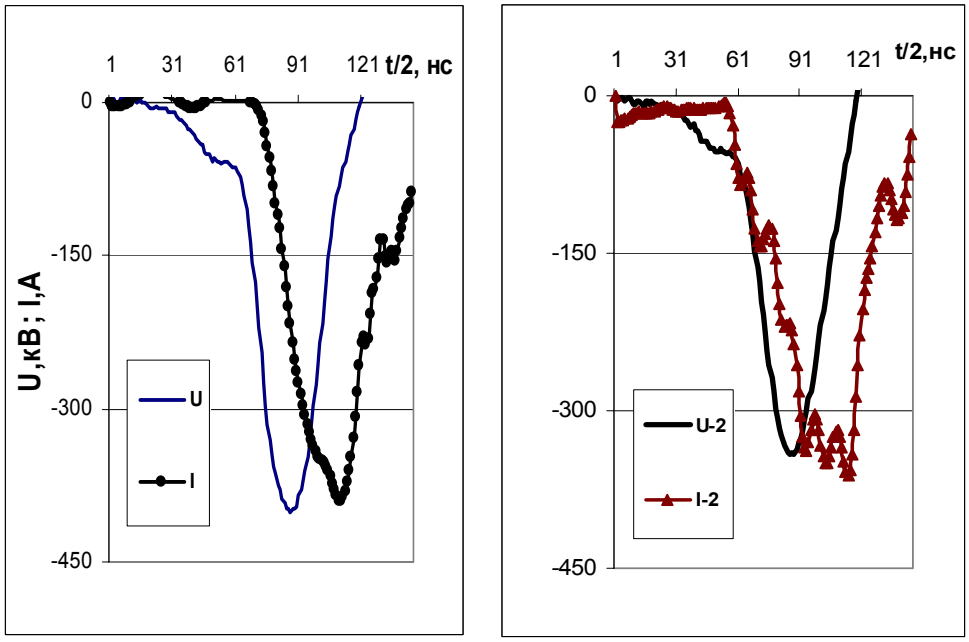


Рис.1.25. Характерные осциллограммы тока пучка и напряжения на вакуумном диоде ускорителя УРТ-0,5 (U,I) и вакуумном диоде для двухстороннего облучения (U-2,I-2)

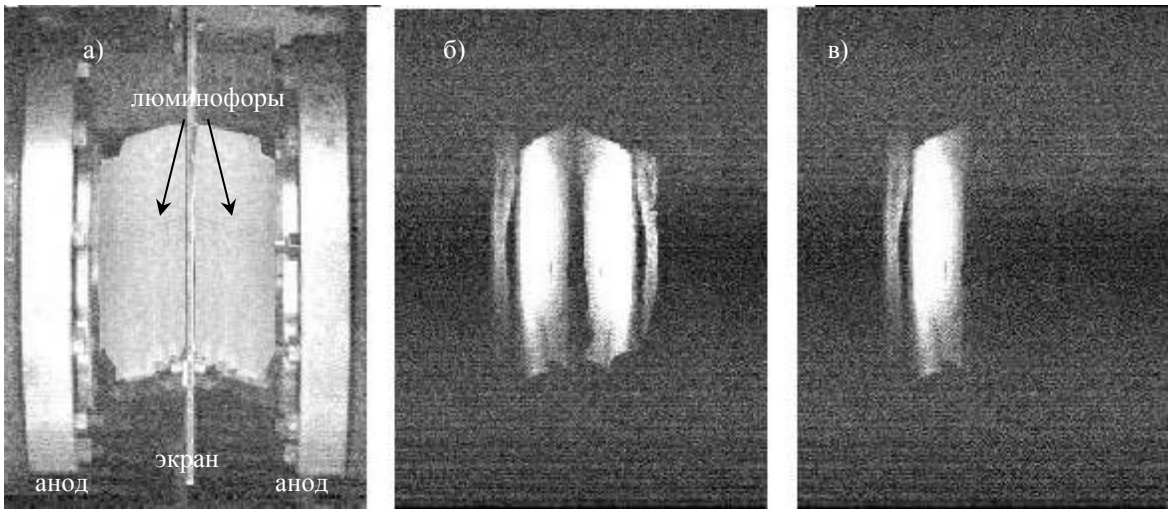


Рис. 1.26. Телекадры выходной части вакуумного диода:
а – при освещении, без пучка; б – в темноте – облучение с двух сторон;
в – в темноте – облучение только слева

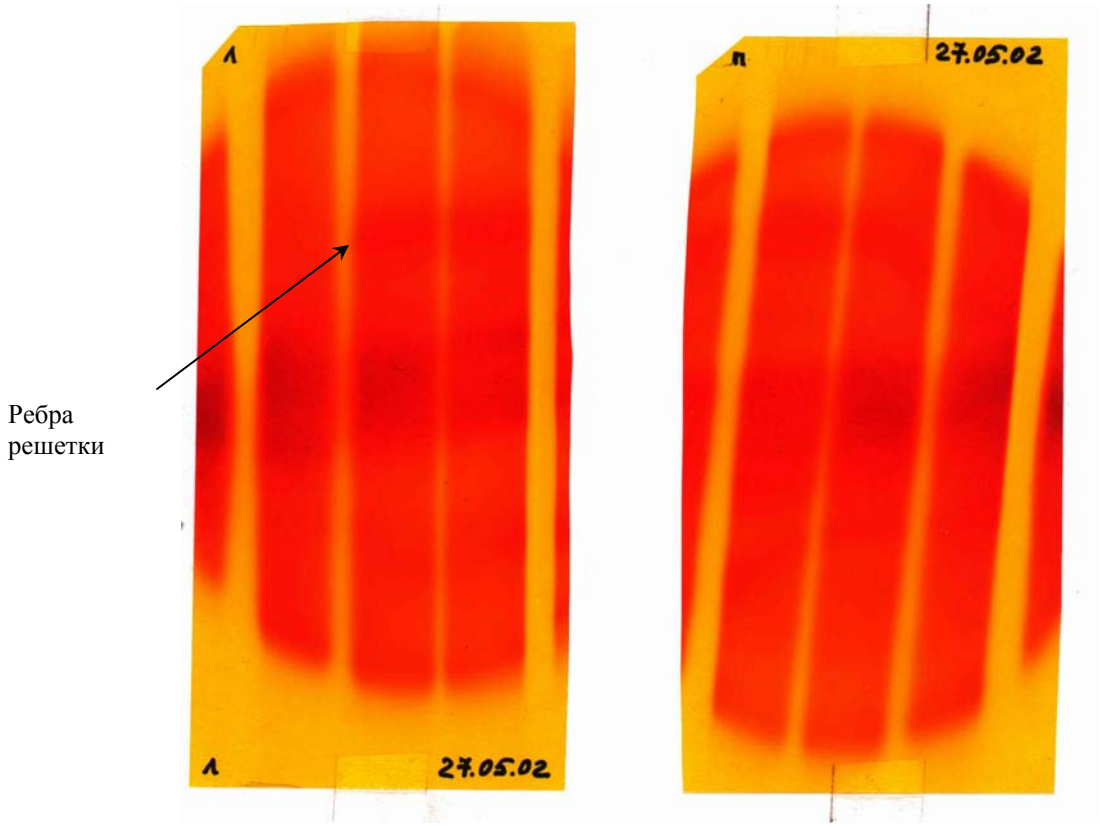


Рис. 1.27. Распределение поглощенной дозы на выходной фольге левого и правого выходных окон (расстояния d1=d2=90 мм)

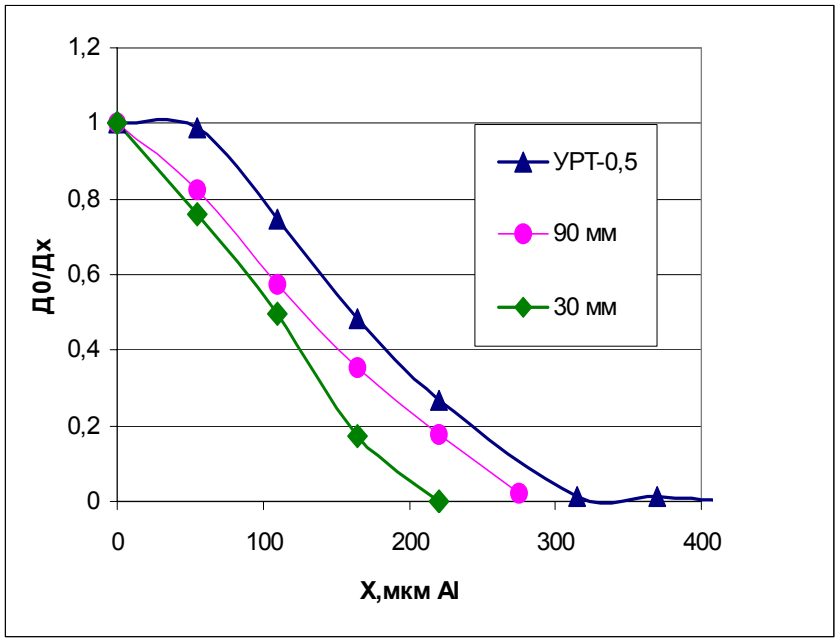


Рис. 1.28. Распределение поглощенной дозы внутри объекта для ускорителя УРТ-0,5, при одностороннем облучении (расстояние анод–катод 90 мм) и двойного диода (d1=d2=90 и d1=d2=30 мм)

Это снижение связано с тем, что два диода включены параллельно и общий импеданс вакуумного диода ускорителя уменьшился, что привело к снижению ускоряющего напряжения. При уменьшении расстояния катод–анод до 30 мм одновременно в обоих диодах происходит снижение проникающей способности электронов за счет снижения импеданса и, соответственно, ускоряющего напряжения (см. рис. 1.28), практически так же, как и в случае с одним диодом. Созданный вакуумный диод успешно работает и позволяет осуществлять облучение объектов с двух сторон, при этом достигается существенное снижение неоднородности облучения образца по глубине (рис. 1.29).

Результаты экспериментов показали наличие большого запаса по вакуумной изоляции диода для двухстороннего облучения, поэтому выполнена успешная экспериментальная проверка возможности работы этого диода на ускорителе УРТ-1 (рис.1.30). Полученные результаты на ускорителе УРТ-1 подтвердили возможность успешной работы вакуумного диода для двухстороннего облучения, использование которого приводит к некоторому снижению ускоряющего напряжения (за счет уменьшения общего импеданса вакуумного диода, рис.1.31.) при существенном улучшении распределения поглощенной дозы в материале (рис.1.32). На конструкцию вакуумного диода для двухстороннего облучения получен патент РФ [1.53].

Таким образом, разработана и экспериментально проверена на различных уровнях ускоряющего напряжения конструкция вакуумного диода для двухстороннего облучения. Использование такого диода приводит к некоторому снижению ускоряющего напряжения при существенном улучшении распределения поглощенной дозы в материале облучаемого объекта и как следствие значительному увеличению производительности ускорителя, например при радиационной стерилизации при том же уровне энергозатрат.

Существенно, что изменяя расстояние катод–анод в одном из плеч диода, можно изменять интенсивность облучения по сторонам объекта, что может быть важным при облучении несимметричных по толщине объектов или материалов, имеющих градиент плотности по толщине.

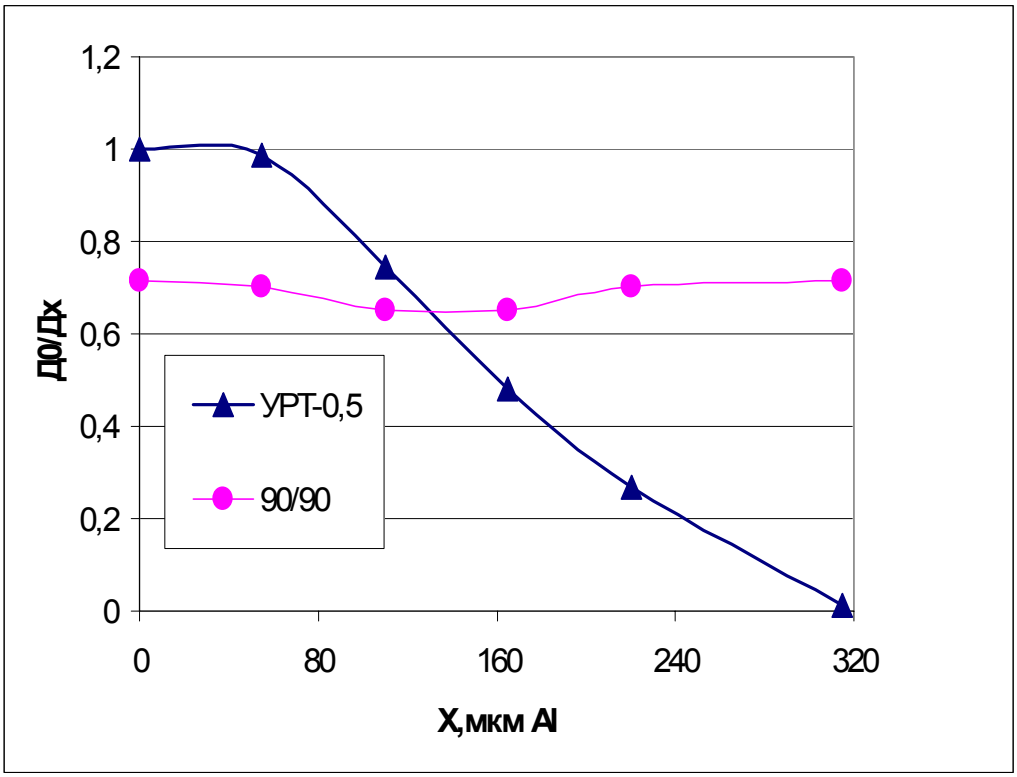


Рис. 1.29. Распределение поглощенной дозы внутри объекта для ускорителя УРТ-0,5 при одностороннем облучении (расстояние катод–анод 90 мм) и двухстороннем (d1=d2=90 мм), величина $Д_0$ для двухстороннего облучения приведена к величине $Д_0$ одностороннего исходя из абсолютного значения поглощенных доз

Таблица 1.8. Результаты экспериментов с двойным диодом

№ п.п.	Левый катод		Правый катод		$Д_л$ / $Д_п$	S_j*
	Расстояние d1, мм	Поглощенная доза, $Д_л$, Гр	Расстояние d1, мм	Поглощенная доза, $Д_п$, Гр		
1	90	811	90	816,5	1,01	1
2	90	825,1	60	1609	1,95	2,01
3	90	825,4	30	4171	5,05	5,9
4	30	4430	30	4930	1,11	1
5	90**	1166	-	-	-	-

S_j – геометрический фактор, связанный с уменьшением диаметра пучка;
***ускоритель УРТ-0,5 с одним диодом.*

Рис. 1.30. Ускоритель УРТ-1 с двойным диодом

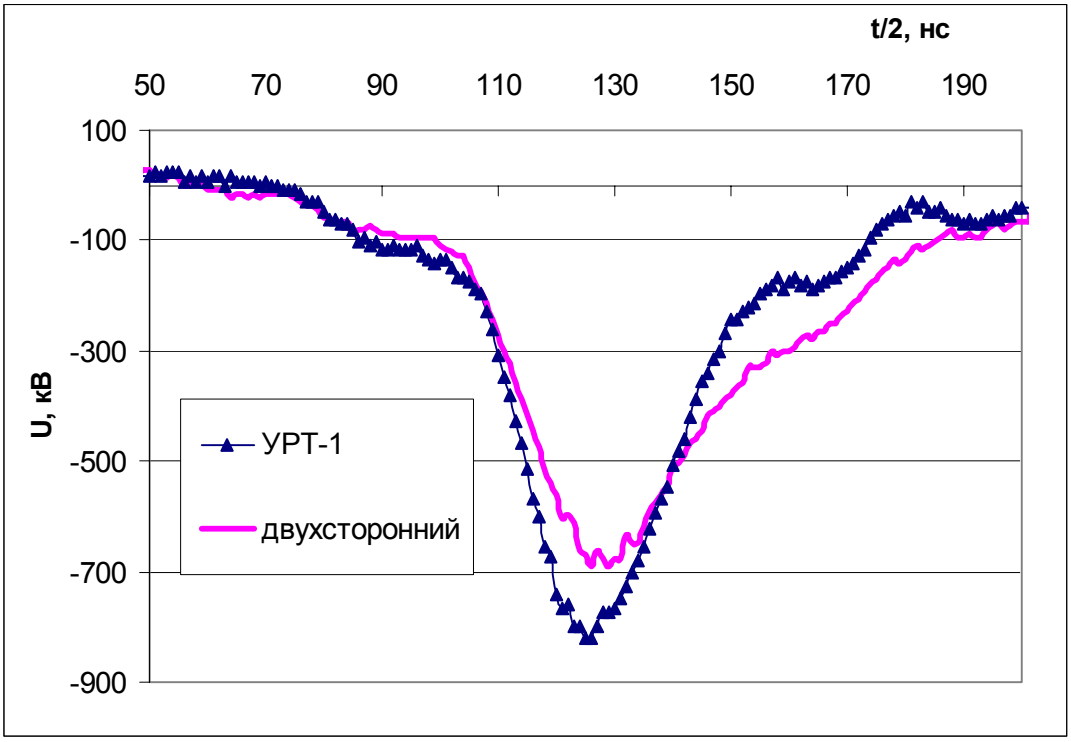


Рис. 1.31. Ускоряющее напряжение УРТ-1 при обычном и двухстороннем диодах

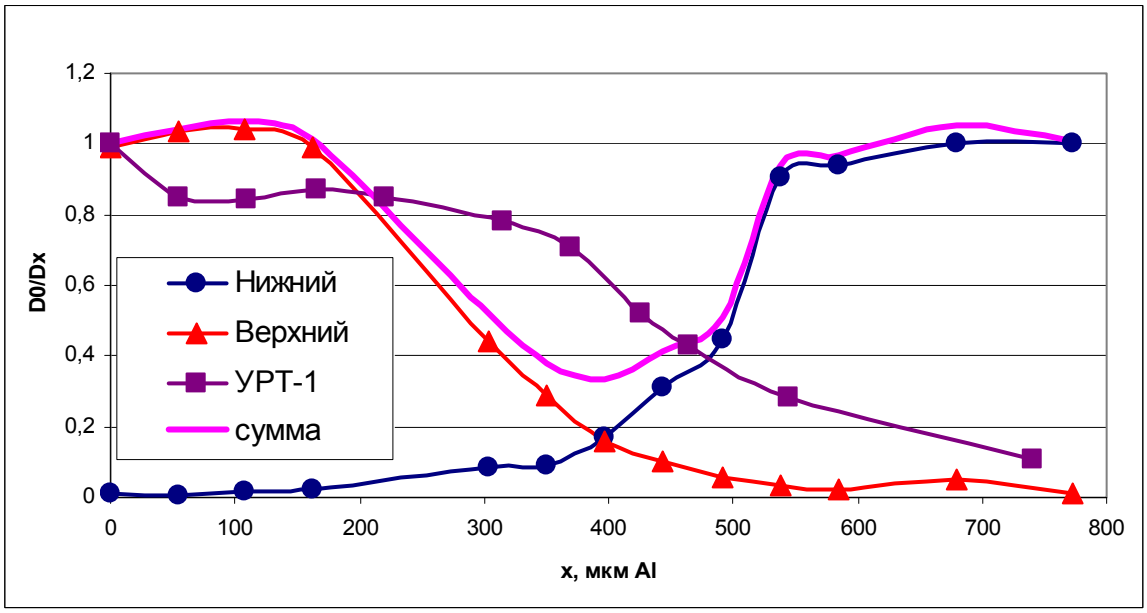


Рис. 1.32. Распределение поглощенной дозы внутри объекта для ускорителя УРТ-1 при одностороннем облучении (УРТ-1) и двухстороннем (сверху и снизу измерено раздельно, и их сумма)

1.7. Выходное окно ускорителей

При применении ускорителей электронов в радиационных технологиях с неизбежностью возникает необходимость вывода электронного пучка в атмосферу или другую облучаемую среду (например жидкость).Обычно для этой цели используется выходное окно, содержащее охлаждаемую опорную решетку и металлическую фольгу, вакуумноплотно установленные на вакуумную камеру. Для улучшения охлаждения применяют выходное окно, содержащее две фольги, пространство между которыми соединено с системой прокачки газа [1.54]. При этом вторая фольга с внешней стороны может быть снабжена системой распределенных равномерно по длине окна изогнутых стержней с круглым сечением, с помощью которых задается скорость обдува, а следовательно, регулируются теплоотдача и температура фольги [1.55].

Однако подобные устройства не исключают прорыва фольги по разным причинам. Такой прорыв вызывает проникновение атмосферы в вакуумную камеру и неблагоприятное воздействие на насосы вакуумной системы. При облучении агрессивных сред это может привести к выходу из строя не только насосов, но и всей вакуумной камеры, т.е. к непоправимой аварии. Для исключения подобного нами предложено и запатентовано решение [1.56] по применению выходного окна ускорителя следующей конструкции (рис.1.33). В пространстве между металлическими фольгами 2 и 5 поддерживается давление ниже атмосферного, но выше, чем в вакуумной камере 3. Это давление контролируется измерительно-сигнальным блоком, который выдает сигнал тревоги при изменении давления в зазоре между фольгами.

Устройство работает следующим образом. После сборки из межфольгового пространства откачивается воздух до давления, равного половине атмосферного (или облучаемой среды), а из вакуумной камеры–до требуемого вакуума. Контрольно-измерительный блок может быть выполнен, например, с электроконтактным мановакуумметром ЭКМВ-1у в виде датчика. Контактные электроды мановакуумметра выставляются по обе стороны от заданного в межфольговом пространстве давления. При прорыве первой фольги давление в межфольговом пространстве повышается, а при прорыве задней – снижается. В обоих случаях стрелка мановакуумметра касается одного из контактов, и измерительно-сигнальный блок выдает сигнал или команду об аварии.

Отметим, что суммарная толщина двух фольг (и ослабление электронов в них) остается практически прежней, так как давление (атмосферное или облучаемой среды)

равномерно распределяется между фольгами. Поэтому фольги должны выдерживать полное давление лишь кратковременно, на время аварии.

Для повышения срока службы металлических фольг в пространстве между ними лучше использовать инертный газ, что предотвратит их окисление как кислородом воздуха, так и озоном и окислами азота, образующимися при облучении.

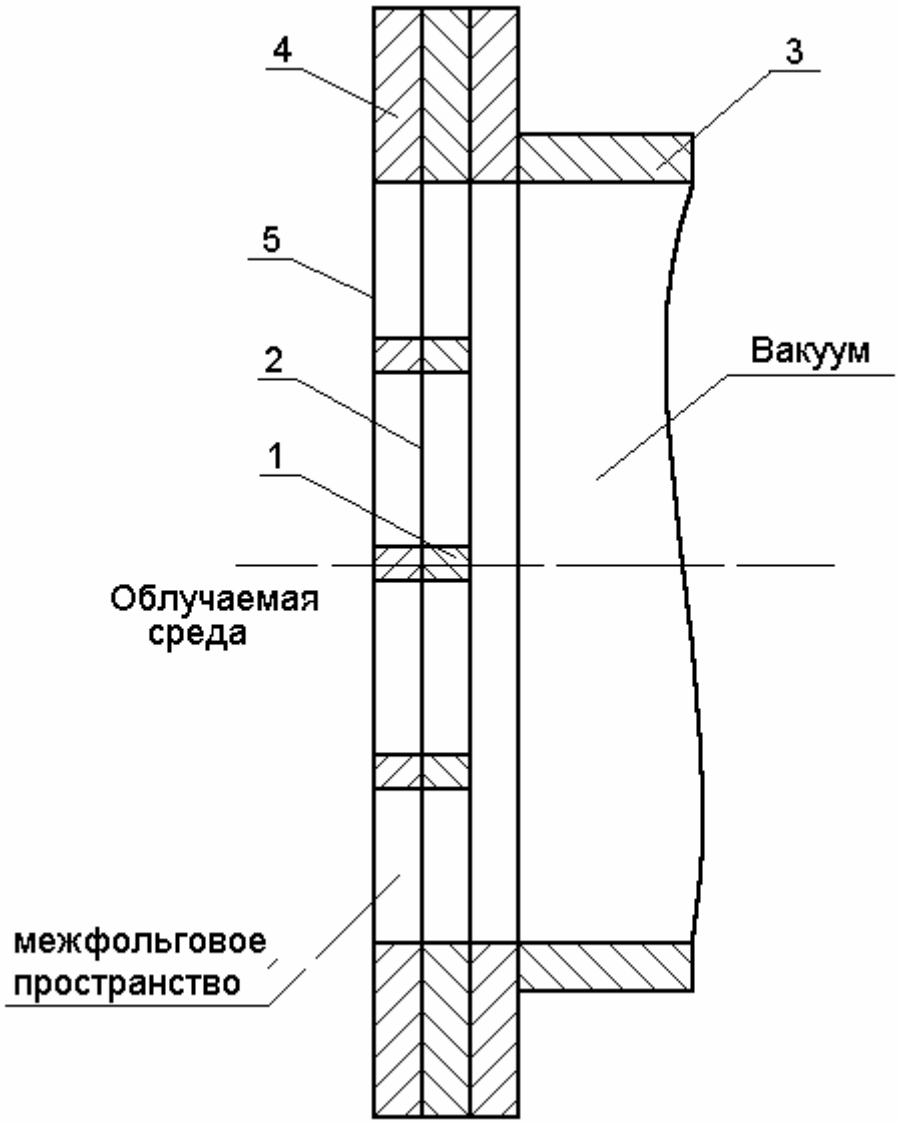


Рис. 1.33. Выходное окно ускорителя:
1- опорная решетка, 2 - первая металлическая фольга, 3 - вакуумная камера, 4 - дополнительная опорная решетка, 5 - дополнительная металлическая фольга

1.8. Выводы по главе 1

Таким образом, создан ряд частотных ускорителей электронов (табл. 1.9.), которые сочетают в себе компактность, простоту конструкции и эксплуатации. Примененная схема формирования импульса высокого напряжения на тиратроне позволяет изменять среднюю мощность ускорителя в широких пределах посредством варьирования высокого напряжения и частоты запуска тиратрона. Экспериментально проверена возможность управления ускоряющим напряжением путем изменения зарядного напряжения от ИВН, что может быть полезно в некоторых РТ, где важен точный подбор энергии электронов, например при стерилизации изделий различной толщины. Показано, что выходное напряжение изменяется пропорционально зарядному, а диапазон управления составляет не менее 40%.

Разработана и экспериментально проверена методика расчета системы питания НУЭ с ППТ со схемой формирования импульса высокого напряжения на тиратроне, которая позволяет существенно уменьшить трудоемкость пусконаладочных работ.

Появилась возможность выбора наносекундного ускорителя, исходя из требований конкретной технологии. Причем данные ускорители как модули, работающие синхронно, при необходимости можно объединять в более мощные системы. Модульная конструкция упрощает, удешевляет и повышает надежность технологической системы.

Разработана и экспериментально проверена конструкция вакуумного диода для двухстороннего облучения, использование которого позволяет либо вдвое увеличить толщину облучаемых изделий, либо в 3–4 раза уменьшить неоднородность облучения по толщине облучаемого объекта. Эти ускорители были использованы для отработки различных радиационных технологий описанных далее в главах 4-6.

На основании документации и результатов испытаний ускорителя УРТ-0,5, переданных на ФГУП «Уральский электромеханический завод», выполнены опытно-конструкторские работы и выпущен опытный ускоритель. На основе его конструкции создан ускоритель УРТ-0,4, который поставлен по контракту в «Chiyoda Technol Corporation в Japan Atomic Energy Research Institute» (Тагасаки, Япония). Ускоритель УРТ-0,5М поставлен в ЗАО «НИИХИТ-2» в г. Саратове для технологической линии радиационного окисления полиэтиленовой пленки.

На основе ускорителя УРТ-1 разработан и изготавливается ускоритель УРТ-1М с вакуумным диодом для двухстороннего облучения для радиационной стерилизации одноразовой медицинской одежды на предприятии ООО «Здравмедтех-Е» в г. Каменск-Уральском.

Таблица 1.9. Параметры наносекундных ускорителей электронов серии УРТ

Параметр	УРТ-0,2	УРТ-0,4	УРТ-0,5	УРТ-1
Ускоряющее напряжение, кВ	200	400	500	900
Длительность импульса, нс	34	50	50	60
Частота работы, Гц	250	1	200	50
Сечение пучка электронов, мм^2	220*30	диам. 30	диам. 120	диам. 170
Плотности тока пучка, А/см^2	0,3	40	10	15
Габариты (длина*ширина*высота), мм: источника высокого напряжения формирующего элемента	 450*300*150 500*600*1350	 450*300*150 диам.700*1250	 450*300*150 диам.700*1250	 500*500*750 900*900*2450
Масса, кг: источника высокого напряжения формирующего элемента	 30 160	 40 260	 40 260	 140 1460
Потребляемая мощность, кВт	3	1,5	4	8
Ресурс, не менее, импульсов	10^9	10^9	10^9	10^9

Список литературы к главе 1

1.1 Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г. и др. РАДАН – малогабаритные сильноточные ускорители электронов импульсно-периодического действия // ПТЭ. 1989. №2. С.146-149.

1.2 Смирнов В.П. Получение сильноточных пучков электронов // ПТЭ. №2. 1977. С.2-31.

1.3 http:.www.inP.nsk.su//products//indaccel//elv.shtml

1.4 Ауслендер В.Л., Балакин В.Е., Булатов А.В. и др. Компактные ускорители электронов // ПТЭ. 1998. №6. С.94-98.

1.5 Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 246 С.

1.6 Долгачев Г.И., Закатов Л.П., Нитишенский М.С., Ушаков А.Г. Сверхмощные частотные генераторы с плазменным прерывателем тока // ПТЭ. 1999. №2. С.3-26.

1.7 Valtman D.S., Ivanov A.S., Nikiforov E.K. et al.”Electron-10” high voltage accelerator for double sided irradiation of flexible materials // Problems of atomic science and technology. 1999. No.3. P.16-17.

1.8 http:.www.titanscan.com//medical//precisionscan.html

1.9 http:.www.crosslinking.com//prod01.htm

1.10 http:.www.inP.nsk.su//products//indaccel//ilu.en.shtml

1.11 Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И. и др. Частотный линейный индукционный ускоритель ЛИУ 0,4/4000 // ПТЭ. 2000. №3. С.159-160.

1.12 Гавриш Ю.Н., Климов А.П., Николаев В.М., Фомин Л.П. Медицинский электронно-лучевой стерилизатор // ВАНТ. Сер. электрофиз. аппаратура. 2002. Вып.1. С.15-16.

1.13 Zavyalov N.V., In’kov V.I., Lisovenko N.A., et al. Development of radiation technologies on VNIIEF LU-10-20 LINAC // Problems of atomic science and technology. 1999. No.3. P.93-94.

1.14 Коровин С.Д., Ростов В.В. Сильноточные наносекундные импульсно-периодические ускорители электронов на основе трансформаторов Тесла // Изв. вузов. Физика. 1996. №12. С.21-30.

1.15 Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д. и др. Ускорители сильноточных электронных пучков с высокой частотой следования импульсов - В кн.: «Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии// под ред. Месяц Г.А.а, Новосибирск, 1983. С.5-21.

1.16 Быков Н.Б., Губанов В.П., Гунин А.В. и др. Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов с высокой стабильностью параметров электронного пучка // ПТЭ. 1989. С.37-39.

1.17 Яландин М.И., Шпак В.Г. . Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона // ПТЭ. 2001. №3. С.5-31.

1.18 http:.www.sandia.gov//pulspowr//ppeng//rhepp_aP.html

1.19 Kim A.A., Kovalchuk B.M. High power direct driver for Z-pinch loads // Proc. of 12th Symposium on High Current Electronics, September 25-29, 2000. Tomsk, P.38-42.

1.20 Ковшаров Н.Ф., Лучинский А.В., Месяц Г.А. и др. Импульсный генератор СНОП-3 // ПТЭ. 1987. №4. С.97-99.

1.21 Котов Ю.А., А.В. Лучинский . Усиление мощности емкостного накопителя энергии прерывателем тока на электрически взрываемых проволочках //Физика и техника мощных импульсных систем // Под ред. Е.П. Велихова. М., 1986. С. 189-210.

1.22 Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. Генератор мощных наносекундных импульсов с вакуумной изоляцией и плазменным прерывателем тока // ДАН СССР. 1985. Т.284. С.857-859.

1.23 Chuvatin A.S., Kim A.A., Kokshenev V.A., Kovalchuk B.M. et. al. A composite POS: fist proof-of-principle from GIT-12 // Digest of Technical Papers 11th IEEE Inter. Pulsed Power Conference. Baltimore, Maryland USA June 29 - July 2, 1997. P. 261-268

1.24 Рукин С.Н. . Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока //ПТЭ. 1999. № 4. С.5-36.

1.25 Kotov Yu.A., Mesyats G.A., Rukin S.N. et al. A novel nanosecond semiconductor opening switch for megavolt repetitive pulsed power technology: experiment and applications // Digest of 9-th IEEE Pulsed Power Conf., 1993, Albuquerque, New Mexico, USA, Vol.1, P. 134-139.

1.26 Дарзнек С.А., Котов Ю.А., Месяц Г.А.. Рукин С.Н. SOS-эффект: наносекундный обрыв сверхплотных токов в полупроводниках // ДАН. 1994. Т.334. №3. С. 304-306.

1.27 Kotov Yu.A., Mesyats G.A., Korzhenevski S.R. et al. Compact repetitive electron beam and X-radiation generator // Proc. Of 10-th IEEE Pulsed Power Conference, 1995. Santa Fe, New Mexico, USA, July 10-13. Vol. 2, P. 1231-1234.

1.28 Загулов Ф.Я., Кладухин В.В., Кузецов Д.Л. и др. Сильноточный наносекундный ускоритель электронов с полупроводниковым прерывателям тока // ПТЭ. 2000. № 5. С. 71-76.

1.29 Filatov A.L., Kotov Yu.A., Korzhenevskii S.R et al . A medical X-ray diagnostic complex based on a compact nanosecond generator // Proc. of 11-th IEEE Pulsed Power Conf., 1997. Baltimore, Maryland, USA, June 29-July 2. Vol. 2, P. 1100-1102.

1.30 Рукин С.Н. . Генерирование мощных наносекундных импульсов на основе полупроводникового прерывателя тока: Дис. в виде научн. докл… д.т.н. Екатеринбург, 1998.

1.31 Любутин С.К. Рукин С.Н. Тимошенков С.П. Исследование полупроводникового размыкателя тока в мощных импульсных генераторах с промежуточным индуктивным накопителем // Тез. докл. IX Симпоз. по сильноточ. электронике, Россия, 1992. С.218-219.
1.32 Котов Ю.А.. Рукин С.Н., Филатов А.Л. Сильноточный ускоритель электронов с полупроводниковым прерывателем тока // Тез. докл. IX Симпоз. по сильноточ. электронике., Россия, 1992. С.220-221.
1.33 Белкин В.С., Марин О.Ю., Шульженко Г.И. Формирователи высоковольных импульсов на серийных диодах // ПТЭ. 1992. № 6. С. 120-124.
1.34 Rukin S.N., Lyubutin S.K., Kostirev V.V., Telnov V.A. Repetitive 200 kV nanosecond all solid state pulser with a semiconductor opening switch // Proc. Of 10-th IEEE Pulsed Power Conf., 1995. Albuquerque, New Mexico, USA, July 10-13. Vol.2, P. 1211-1214.
1.35 Бушляков А.И., Понаморев А.В., Рукин С.Н. и др. Мегавольтный наносекундный генератор с полупроводниковым прерывателем тока // ПТЭ. 2002. №2. С.74-81.
1.36 Грехов И.В. Импульсная коммутация больших мощностей полупроводниковыми приборами // Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П. Велихова. М., 1986. С. 237-253.
1.37 Мешков А.Н. Магнитные генераторы мощных наносекундных импульсов // ПТЭ. 1990. №1. С.23-37.
1.38 Месяц Г.А. . Эктоны. Ч.2// Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 243 С.
1.39 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,2, ПТЭ. 1997. № 4. С.84-86.
1.40 Кацнельсон Б.В., Калугин А.М., Ларионов А.С. Электровакуумные электронные и газоразрядные приборы: Справочник. М.: Радио и связь, 1985.
1.41 Котов Ю.А., Филатов А.Л., Родионов Н.Е. и др. // Вакуумный изолятор с экранировкой поверхности диэлектрика // ПТЭ. 1986. № 2. С. 138-141.
1.42 Бугаев С.П., Илюшкин В.А., Литвинов Е.А., Шпак В.Г. Взрывная эмиссия электронов из металлодиэлектрического катода // ЖТФ. 1973. Т.XLIII. вып.10. С. 2138-2142.
1.43 Генералова В.В., Гурский М.Н. Дозиметрия в радиационной технологии. М.: Изд-во стандартов, 1981.184 С.
1.44 Бичев В.Р., Готлиб В.И. Термолюминесцентный дозиметрический комплект // ПТЭ. 1981. №1. С.273.
1.45 ВдовинС.С. Проектирование импульсных трансформаторов. Л.:Энергия, 1971,148С.

1.46 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5// ПТЭ. 2000. №1. С. 112-115.
1.47 http:.www.gexcorporation.com//windose.html
1.48 Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Степанянц А.Л. Высокочастотный генератор на основе реверсивно включаемых динисторов для мощных систем индукционного нагрева // ПТЭ. 2000. №1. С. 70-73.
1.49 Kotov Yu.A., Sokovnin S.Yu. and Balezin M.E. Frequency Nanosecond Electron Accelerator URT-1 // Proc. of 7th Inter. Conference on Electron Beam Technologies, 1 – 6 June 2003. Varna, Bulgaria, P. 633-638.
1.50 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. . Металлокерамический катод // Патент РФ № 2158982. БИ. 2000. №31. С. 403.
1.51 Козлов Ю.Д., Никулин К.И., Титков Ю.С.Расчет параметров и конструирование радиационно-химических установок с ускорителями электронов. М. Атомиздат, 1976. 176 С.
1.52 Mesyats, G.A., Shpak, V.G, Yalandin M.I. and Shunailov S.A.. Compact RADAN electron accelerators for testing new radiation technologies and sterilization //Radiat. Phys. Chem. 1995. Vol. 46, No 4-6, P. 489-492.
1.53 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. . Вакуумный диод для двухстороннего облучения // патент РФ № 2233564. БИ. 2004. №21. С.459.
1.54 Семенов О.В. и др. Выпускные окна сильноточных электронных ускорителей // Доклад II Всесоюз. совещания по применению ус-корителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Ленинград, 1976. Т.2. С. 116-122.
1.55 Иванов А.С., Коморин Л.В. Дмитриев С.Д. и др. Охлаждаемое выпускное окно ускорителя электронов. А.С. (СССР) № 643049, класс Н05Н 5//02.
1.56 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю. Выходное окно ускорителя заряженных частиц // Патент РФ № 2137247. БИ. 1999. №25. С.569
1.57 Бочков В.Д., Королев Ю.Д., Франк К.Ф. и др. Псевдоискровые разрядники для схем питания импульсных лазеров// Изв. вузов. Физика. 2000. №5. С.97-105.