

ГОУ ВПО УГТУ-УПИ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ УРО РАН

СОКОВНИН Сергей Юрьевич

НАНОСЕКУНДНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ И  
РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ИХ ОСНОВЕ

Екатеринбург, 2007

УДК

С.Ю. Соковнин д.т.н.  
Научный редактор:

Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе /С.Ю. Соковнин. - Екатеринбург: издательство «\_\_\_\_\_», 2007. - 260 с.

ISBN

В монографии описаны принципы создания и конструкция импульсно–периодических наносекундных ускорителей электронов, а также технология разработки и конкретные радиационные технологии на их основе.

Развитие техники генерации высоковольтных импульсов наносекундной длительности на основе эффекта наносекундного обрыва тока в полупроводниковых диодах создало предпосылки для разработки наносекундных ускорителей электронов импульсно–периодического режима действия. Такие ускорители генерируют пучки большого сечения с высокой интенсивностью, обладающие сильным биологическим действием, однако для создания промышленных ускорителей и реализации высокоэффективных радиационных технологий необходимо обеспечить требуемый диапазон параметров пучка, высокую надежность и ресурс ускорителей и создать высокопроизводительные методики обработки материалов, в которых будут наиболее эффективно использованы достоинства наносекундных пучков.

Книга может быть использовано в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов физических специальностей, в том числе по курсу «Физические установки» и справочника при курсовом и дипломном проектировании для направления 14030 – Ядерные физика и технологии, специальностей 140 306 – «Электроника и автоматика» и 330300 «Радиационная безопасность человека и окружающей среды». Содержит обширный фактический материал.

Библиогр.: 190 назв. Рис. 120. Табл.42.

Печатается по решению ученого совета Института электрофизики УрО РАН и кафедры экспериментальной физики ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»

© Издательство «\_\_\_\_\_»

Оглавление	Стр.
Введение	6
Глава 1. Наносекундные ускорители электронов для радиационных технологий	16
1.1 Наносекундные ускорители электронов	16
1.2 Описание механизма работы полупроводникового прерывателя тока	21
1.3 Применение полупроводникового прерывателя тока	22
1.4 Расчет схем питания НУЭ с ППТ	25
1.5 Описание ускорителей для радиационных технологий (УРТ)	26
1.6. Вакуумный диод для двухстороннего облучения	52
1.7. Выходное окно ускорителей	62
1.8. Выводы по главе 1	64
Список литературы к главе 1	66
Глава 2. МДМ–катоды для наносекундных ускорителей электронов	70
2.1. Введение	70
2.2. Исследования элемента МДМ–катода на ускорителе УРТ-0,2	72
2.3 Исследования свечения плазмы МДМ–катода	84
2.4. Выводы по главе 2	87
Список литературы к главе 2	88
Глава 3. МК–катоды для наносекундных вакуумных диодов.	90
3.1. Введение	90
3.2. Описание конструкции МК–катодов	90
3.3. Постановочные исследования МК–катодов	93
3.4. Обсуждение результатов экспериментов с МК–катодом	99
3.5. Расширенные исследования свойств МК катодов	102
3.6. Анализ характеристик МК–катодов	108
3.7. Оптические исследования МК–катода	113
3.8. Исследование влияния площади МК–пластины на свойства вакуумного диода	122
3.9. Исследования МК–катода с различными генераторами	129
3.10. Экранированный МК–катод	137
3.11. Выводы по главе 3	143
Список литературы к главе 3	144
Глава 4. Радиационные технологии на основе ускорителей типа УРТ	146

4.1. Введение	146
4.2. Исследование возможности применения наносекундного электронного пучка для очистки воды	146
4.3. Исследование возможности применения НЭП для стерилизации продуктов	155
4.4. Исследование возможности применения НЭП для стерилизации медицинских изделий	162
4.5. Исследование возможности применения НЭП для стерилизации писем	178
4.6. Исследование радиационной устойчивости внутренней памяти программируемых цифровых микросхем	183
4.7. Выводы по главе 4	186
Список литературы к главе 4	188
Глава 5. Радиационно-химическая стерилизация	190
5.1. Генерация озона наносекундным электронным пучком	190
5.2. Использование НЭП для радиационно-химической стерилизации	195
5.3. Применение радиационно-химической стерилизации	198
5.4. Выводы по главе 5.	214
Список литературы к главе 5	216
Глава 6. Радиационно-химические технологии	218
6.1. Введение	218
6.2. Модификация поверхности полимеров.	219
6.3. Технология производства сорбентов.	223
Список литературы к главе 6	231
Глава 7. Измерение параметров, мониторинг и дозиметрия НЭП.	232
7.1. Общие положения	232
7.2. Рентгеновская диагностика НЭП	233
7.3. Измерение энергии электронов методом фильтров	238
7.4. Применение твердотельных детекторов для мониторинга НЭП	241
7.5. Выводы по главе 7	244
Список литературы к главе 7	245
Заключение	247
Приложение. Расчет схем питания НУЭ с ППТ	250

## Введение

В течение последнего десятилетия произошел прогресс в создании частотных генераторов высоковольтных импульсов, связанный с открытием эффекта наносекундного обрыва тока высокой плотности в полупроводниковых диодах [В.1, В.2] (далее названный SOS-эффектом [В.3]) и развитием этого подхода [В.4-В.6]. Созданные на основе этого эффекта полупроводниковые прерыватели тока (ППТ) дали возможность разработать экспериментальные образцы частотных наносекундных ускорителей электронов (НУЭ) (табл. В.1), и поставить вопрос как о разработке самих ускорителей, пригодных для коммерческих применений, так и о поиске таких приложений, которые позволят использовать достоинства НУЭ.

Отметим, что автор сознает некоторую обобщенность использованного названия - ППТ, которое включает кроме SOS –диодов (именно которые используются в настоящей работе) и другие типы полупроводниковых прерывателей, например дрейфовые диоды с резким восстановлением [В.7].

В настоящей работе рассматриваются именно коммерческие приложения НУЭ на основе ППТ. Подобное сужение области применений оправдано тем, что, во-первых, вопросы применения НУЭ в научных исследованиях, военном деле и других специальных применениях уже рассмотрены достаточно полно [В.8], во-вторых, НУЭ с ППТ наиболее молодые из большого числа имеющихся типов импульсных ускорителей электронов и кратко описаны только в работах Г.А. Месяца [В.9, В.10].

Исходя из того, что как сами характеристики ускорителя позволяют наметить круг приложений, так и конкретное приложение существенно влияет на требуемые параметры и конструкцию ускорителя, целесообразно кратко рассмотреть особенности пучков электронов, формируемых НУЭ и возможные области коммерческих применений НУЭ, а также вытекающие из них требования к ускорителям. Конечным продуктом работы любого ускорителя электронов является пучок. Поэтому особенно важно иметь представление, как обо всех возможных достоинствах, так и недостатках формируемого пучка электронов.

В начале рассмотрим достоинства наносекундных электронных пучков (НЭП).

Таблица В.1. Параметры разработанных в ИЭФ УрО РАН генераторов и ускорителей электронов с полупроводниковым прерывателем тока

Установка	Система сжатия импульса	U, кВ	W, Дж	T <sub>и</sub> , нс	Частота следования импульсов, Гц постоянно (пачка)	Литература
<b>Генераторы</b>						
Сибирь	ПТСК	1000	300	100	150	[В.5]
СМ-1	ПТСК	200	6	40	50 (300)	[В.6]
СМ-1Н	ПТСК	250	8	24	100 (1000)	[В.6]
СМ-2Н	ПТСК	140	0,8	32	1000 (5000)	[В.6]
СМ-3Н	ПТСК	450	10	40	300 (2000)	[В.6]
СМ-4Н	ПТСК	150	0,9	18	10 (100)	[В.6]
С-5Н	ПТСК	1000	60	50	500 (1000)	[В.6]
Б/н	ПТСК	500-1000	45	40-60	300 (850)	[В.11]
б/н	ПТСК (два каскада)	400-1000	30	8-10	300 (1000)	[В.12]
Б/н	Тиратрон+ППТ	40-80	не дано	20-70	100	[В.13]
<b>Ускорители</b>						
Малахит	ПТСК	250	3	50	300 (3 000)	[В.14]
Технологический	ПТСК	350	7	25	100	В.15]
Контроль	ПТСК	30-120	0,2	15-20	100 (10 000)	[В.16]
УРТ-0,2	Тиратрон+ППТ	200	1,75	35	250	[В.17]
УРТ-0,5	Тиратрон+ППТ	500	6,25	50	200	[В.18]
УРТ-1	Тиратрон+ППТ	900	25	60	50	[В.19]
Б/н	ПТСК	400	7	40	200	[В.20]

Примечание: ПТСК - установка с полностью твердотельной системой коммутации; U – максимальное или ускоряющее напряжение; W – энергия в импульсе на нагрузке (в пучке электронов); T<sub>и</sub> - длительность импульса на полувывсоте; Б/н – без названия.

Прежде всего, НЭП имеют существенно более сильное биологическое воздействие (не менее чем вдвое при равной поглощенной дозе [В.21]), чем электронные пучки постоянного тока. Это обусловлено существенным, в  $10^6$  раз и более, превышением мощности в течение импульса над средней мощностью. Малая длительность импульса приводит к появлению нескольких факторов, самостоятельно обладающих биологическим действием, но усиливающих воздействие друг друга при одновременном наличии (синергетический эффект): поглощенная доза, электромагнитный импульс, ударная волна и химические радикалы.

Заметим, что НЭП могут быть сформированы именно того размера, который требуется исходя из размеров объекта облучения, что исключает энергозатраты развертывание пучка по площади, как в случае пучков постоянного тока или микросекундных, и позволяет избежать многих проблем, связанных со сканированием. Прежде всего, это неравномерность облучения, связанная с распределением пучка круглого сечения по площади и неоднородность облучения по глубине, вызываемая изменения угла падения электронов на образец при развертке пучка. Отметим, что создание самой системы сканирования представляет серьезную техническую задачу.

Существенно, что катоды, служащие для формирования НЭП, не требуют дополнительных источников энергии, как в случае пучков постоянного тока (для нагрева или создания плазмы). Кроме того, они не требуют для работы высокого вакуума и легко выдерживают даже ударные разгерметизации.

Естественно, НЭП, формируемые ускорителями с системой питания с ППТ, имеют и недостатки. Самым серьезным из них является их немонотонность. Вызвано это тем, что НУЭ с системой питания с ППТ являются ускорителями прямого действия и энергия ускоряемых электронов зависит от приложенного к промежутку катод—анод импульса напряжения. Таким образом, в спектр формируемого НЭП включаются электроны, формирующиеся на фронте и спаде импульса напряжения.

Наличие этих низкоэнергетичных электронов приводит, как правило, к негативным последствиям. В силу меньшей проникающей способности, они сильнее поглощаются в выходной фольге ускорителя и поверхностных слоях облучаемого объекта, вызывая увеличение термической нагрузки на фольгу и изменяя распределение поглощенной дозы в материале мишени по глубине.

Создание источников ионизирующего излучения вызвало к жизни радиационные технологии, т.е. технологии, в которых главным действующим средством является само излучение.

Радиационные технологии (РТ) можно подразделять как по виду используемого излучения, так и по типу производимых воздействий. По последнему критерию можно выделить:

- Радиационно-химические технологии, в которых под действием излучения происходит химическая реакция: деструкция, полимеризация, образование твердых веществ с ионами растворенных элементов и др.;
- Радиационно-физические технологии, в которых под действием излучения происходят физические процессы (ядерные реакции, диффузия, легирование, наведение дислокаций, испарение мишеней, очистка поверхности, сварка и т.п.);
- Радиационно-биологические технологии, в которых под действием излучения происходят биологические процессы (радиационная генетика);
- Радиационная стерилизация и пастеризация (выделяется из-за практической важности)- полное уничтожение или снижение концентрации до заданного уровня микроорганизмов в изделиях и продуктах с помощью излучения.

Главное преимущество РТ состоит в воздействии на атомы вещества, что дает:

- Требуемый эффект при нормальных условиях (например полимеризация без повышенной температуры и при нормальном давлении);
- Существенную (в разы!) экономию энергии на проведение процесса (полная стерилизация осуществляется практически мгновенно при нагреве, без учета потерь тепла, изделия примерно на 4°C);
- Возможность проведения нескольких процессов одновременно (например стерилизации и полимеризации);
- Возможность создания принципиально новых технологий (сополимеризация на поверхности полимерных пленок).

Недостатки радиационных процессов состоят в следующем.

- Повышенная опасность для обслуживающего персонала.
- Требуется персонал с высоким уровнем квалификации.
- Дороговизна источников радиации.
- Многофакторность воздействия, т.е. протекание нескольких процессов одновременно (например стерилизации и деструкции).



Очень существенную роль в настоящее время в внедрении РТ играют неподготовленность общества к широкому внедрению радиационных технологий и радиофобия.

Достоинства и недостатки используемых источников радиации указаны в табл. В.2. Существенно расширить область применений радиационных технологий можно путем создания источников излучений, заметно снижающих указанные недостатки радиационных технологий.

Отметим, что из всех РТ широкое применение находит только радиационная стерилизация. Связано это с тем, что данная РТ практически незаменима во многих случаях в силу того, что конкурирующие виды стерилизации (термическая, химическая и др.) иногда принципиально невозможно использовать для некоторых материалов и изделий.

Важно, что во всем мире набирает силу тенденция использования в медицине и упаковке пищевых продуктов одноразовых изделий, большинство из которых изготавливают из нетермостойких материалов. Одновременно происходит ужесточение гигиенических нормативов. Обе эти тенденции расширяют рынок радиационной стерилизации, что позволяет оптимистично рассматривать будущее таких технологий.

Коммерческое использование ускорительной техники делает наиболее важными технико-экономические качества ускорителей, а именно дешевизну; простоту изготовления, ввода в эксплуатацию и обслуживания; надежность и долговечность.

К моменту начала данной работы имелось большое количество выполненных экспериментов, которые позволяли очертить круг возможных коммерческих применений НУЭ с системой питания с ППТ.

Существенным недостатком всех ускорителей прямого действия является принципиальная сложность получения высоких энергий электронов, что ограничивает сферы их применений. Важный вопрос – оптимальный диапазон энергий электронов. Возможны два подхода к данному вопросу, с точки зрения, как формирования пучка, так и приемлемости для определенных технологий.

Таблица В.2. Источники излучения для РТ:

№ п.п.	Источник излучения	Достоинства	Недостатки
1	Гамма-излучение изотопов (обычно $^{60}\text{Co}$ , $^{137}\text{Cs}$ )	Автономность, дешевизна излучения	Нельзя "выключить", дороговизна и сложность утилизации
2	Реактор или отработанные сборки с топливом	Высокая интенсивность, дешевизна излучения	Высокая радиационная опасность, смешанный состав излучения, активация объектов облучения
3	Ускорители заряженных частиц постоянного тока	Хорошая управляемость	Небольшая глубина проникновения излучения, высокая стоимость
4	Частотные импульсные ускорители электронов	Хорошая управляемость, дешевизна	Небольшая глубина проникновения излучения

Рассмотрим нижний предел энергий электронов. Его величина задается возможностью вывода пучка в атмосферу. Вывести пучок электронов с энергией ниже 150 кэВ практически невозможно. Вместе с тем активация облучаемого продукта, как правило, не допустима. Поэтому применение электронов с энергией более 10 МэВ возможно только в специальных областях.

Таким образом, диапазон энергий электронов для коммерческих применений лежит в пределах 0,15-10 МэВ. В настоящее время сложно надеяться на создание частотного НУЭ с системой питания с ППТ на энергию 10 МэВ в силу ряда технических трудностей. Освоенный диапазон энергий электронов составляет не более 1 МэВ, что существенно ограничивает возможные области применения.

Указанный диапазон 0,15-1 МэВ можно разделить на три группы по наиболее значимым возможным областям применения:

- ◆ Радиационные технологии в газах, на поверхности и в тонких пленках - до 0,2 МэВ;
- ◆ Радиационная стерилизация одноразовых изделий - до 0,5 МэВ;
- ◆ Облучение жидкостей и сыпучих материалов - до 1 МэВ.

Второй важнейшей характеристикой ускорителя является мощность пучка электронов, выведенного в атмосферу. Имеется два аспекта у данного вопроса: техническая сложность формирования пучка и экономическая эффективность. Верхняя граница выходной мощности для НУЭ лежит на уровне 50-100 кВт, а вопрос экономической эффективности не так однозначен и зависит от конкретного применения.

На взгляд автора, к этому вопросу достаточно продуктивен подход, учитывающий все аспекты создаваемой технологии. Например, при рассмотрении вопроса о технологической линии радиационной стерилизации медицинских изделий величина энергии электронов должна выбираться исходя из толщины облучаемых изделий (или их упаковки) с учетом неравномерности создаваемой по глубине поглощенной дозы, а мощность ускорителя, исходя из реально требуемой производительности.

Относительно небольшая энергия электронов НУЭ требует производить облучение изделий поштучно, позиционируя их под пучком посредством конвейера. Из расчетных данных видно (табл. В.3), что при мощности ускорителя 1,5 кВт потребуются обеспечить скорость конвейера более 1,3 м/с. Это достаточно сложно технически осуществить для наиболее массовых медицинских изделий (хирургических игл, шприцов и т.п.), которые представляют собой легкие полимерные изделия в пакетах, легко смещаемые встречным потоком воздуха. Кроме того, производительность линии стерилизации достигнет явно завышенных значений, не связанных с реальными потребностями производителей медицинских изделий (например, ООО «Медин-Н» - ведущий производитель шовного хирургического материала на Урале - производит не более 100 000 пакетов в месяц). Сочетание же достоинств НУЭ при экономически обоснованной мощности позволит иметь относительно небольшую величину биологической защиты, что даст реальную возможность встраивать ускорители прямо в существующие технологические линии.

Кроме того, разумный выбор средней мощности и энергии ускорителя позволяет снизить стоимость ускорителя, а значит, снизить порог внедрения и расширить круг возможных потребителей, прежде всего за счет малых и средних предприятий.

Сказанное позволяет сформулировать задачи, которые освещены в данной работе, а именно:

- ◆ Создание прототипов наносекундных ускорителей электронов для коммерческих применений на основе схемы тиратрон – импульсный трансформатор – ППТ с энергией электронов до 1 МэВ и выходной мощностью в пучке до 1 кВт.
- ◆ Создание катодов для НУЭ, имеющих высокие эксплуатационные характеристики.
- ◆ Разработка технических решений для реализации эффективных схем облучения, прежде всего двухстороннего.
- ◆ Разработка основ конкретных радиационных технологий.
- ◆ Разработка простых и эффективных систем контроля параметров НЭП.

Таблица В.3. Расчет производительности НУЭ УРТ-0,5 [В.18]  
при радиационной стерилизации

Параметр	Ед. измерения	Колич.
Требуемая для стерилизации поглощенная доза	кГр	25
Длина облучаемого пакета	см	10
Ширина облучаемого пакета	см	5
Энергия электронов	МэВ	0,5
Ток пучка электронов	А	300
Длительность импульса на полувысоте	нс	50
Поверхностная доза за импульс	Гр	500
Частота работы ускорителя	Гц	200
Мощность ускорителя в пучке	кВт	1,5
Требуемое колич. импульсов для набора требуемой дозы	шт.	50
Время набора требуемой дозы	с	0,25
Суммарное время облучения 1 пакета	с	0,125
Требуемая скорость конвейера	см/с	40
Производительность (расчетная)		
	шт./с	8
	шт./ч (коэфф. загрузки 0,5)	14 400
	шт./смену(за 6 ч)	86 400
	шт./год (250 смен)	<b>21 160 000</b>

Настоящая монография представляет собой попытку обобщить современное состояние промышленных импульсно-технологических ускорителей на основе ППТ. Основные материалы получены автором вместе с коллегами, в основу положена докторская диссертация.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю признательность члену-корреспонденту РАН Ю.А. Котову за инициирование работы, многолетнее научное руководство, полезные обсуждения и советы, без которых ее выполнение было бы невозможно. Кроме того, автор выражает признательность н.с. М.Е. Балезину, инженерам В.И. Ко-

жевникову и В.А. Григорьеву за помощь в проведении экспериментов; к.т.н. И.В. Бекетову и О.М. Саматову за наработку порошков для создания МК–пластин; к.ф.-м.н. А.М. Мурзакаеву за подготовку смесей порошков для МК–пластин и изготовление фотографии на электронном микроскопе; д.ф.-м.н. В.В. Иванову и сотрудникам лаборатории прикладной электродинамики за компактирование и спекание образцов МК–пластин. Затем, автор выражает свою признательность всем сотрудникам лаборатории импульсных процессов, многолетнее общение с которыми, поддерживало его оптимизм и позволяло выполнять успешно работу, а также многим сотрудникам Института электрофизики УрО РАН, прежде всего д.т.н. С.Н. Рукину, д.т.н. А.Л. Филатову и д.ф.-м.н. Е.А. Литвинову, общение и дискуссии с которыми позволяли критически оценивать результаты работы.

### Список литературы ко введению

- В.1 Любутин С.К. Рукин С.Н. Тимошенко 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.
- В.2 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.
- В.3 Дарзнец 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.
- В.4 Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.Л. Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов // ДАН. 1993. Т. 330, N 3. С. 315-317.
- В.5 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.
- В.6 Рукин С.Н. . Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока // ПТЭ. 1999. № 4. С.5-36.
- В.7 Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах с дрейфовым механизмом восстановления напряжения // Письма в ЖТФ. 1983. Т.9. Вып.7. С. 435-439.
- В.8 Месяц Г.А. . Эктоны. Ч.3// Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. 263 С.
- В.9 Месяц Г.А. / Импульсная энергетика и электроника –М.: Наука, 2004, 704с.
- В.11 Бушляков А.И., Пономарев А.В., Рукин С.Н. и др. Мегавольтный наносекундный генератор с полупроводниковым прерывателем тока // ПТЭ. 2002. №2. С.74-81.
- В.12 А.И. Бушляков, С.К. Любутин, А.В. Пономарев и др. // Наносекундный SOS - генератор с пиковой мощностью 4 ГВт / ПТЭ, 2006, № 4, С.72-78.
- В.13 Бакшт Е.Х., Визирь В.А., Кунц С.Э. и др. Накачка импульсных лазеров с продольным разрядом от генератора с индуктивным накопителем и полупроводниковым прерывателем тока // Оптика атмосферы и океана». 2000. Т.13, №3. С. 243-249.
- В.14 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.

- B.15 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.
- B.16 Filatov A.L., Korzhenevski S.R., Scherbinin S.V. CONTROL diagnostic X-ray apparatus with a digital image visualization system// Proc. of 12th Intern. Conf. on High Power Part. Beams, June 7-12, 1998. Haifa, Israel, Vol.2, P.1001-1003.
- B.17 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,2, ПТЭ. 1997. № 4. С.84-86.
- B.18 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Бalezin M.E. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5// ПТЭ. 2000. №1. С. 112-115.
- B.19 Kotov Yu.A., Sokovnin S.Yu. and Balezin M.E. Frequency Nanosecond Electron Accelerator URT-1 // Proc. of 7<sup>th</sup> Inter. Conference on Electron Beam Technologies, 1 – 6 June 2003. Varna, Bulgaria, P. 633-638.
- B.20 Загулов Ф.Я., Кладухин В.В., Кузнецов Д.Л. и др. Сильноточный наносекундный ускоритель электронов с полупроводниковым прерывателем тока // ПТЭ. 2000. № 5. С. 71-76.
- B.21 Васильев Н.В., Горн А.К., Качушкина Г.Г. и др. Использование сильноточных наносекундных электронных пучков для целей поверхностной стерилизации. ДАН СССР. 1980. Т.253. № 5. С.1120- 1122.