

УДК 621.384.6:621.039.8

Российские электронно-лучевые технологии в 2013 году

Ю.С. Павлов

ИФХЭ РАН, Москва, Россия

В эксплуатации в 2013г. находятся свыше 60 ускорителей в составе радиационно-технологических установок на более 50 предприятиях для реализации более 20 процессов: стерилизации, радуризации, модификации полимеров, полупроводников и др. Электронные ускорители с энергией 0,1÷10 МэВ разрабатываются в 12 организациях России. Ускорители, прошедшие сервисное обслуживание, имеют среднюю наработку на отказ более 400 часов при коэффициенте технического использования 0,9. Долговечность отечественных СВЧ-приборов: триоды до 9000 час., клистроны - 8000 час., магнетроны 7500 час.

Ускоритель, электрон, технология, клистрон, магнетрон, стерилизация, радуризация, модификация

Российская промышленность разработала в 1980-2013 гг. для осуществления промышленных радиационно-технологических процессов более 200 ускорителей (без учета ускорителей для медицины, дефектоскопии и томографии). В эксплуатации в 2013 г. в России находятся более 60 ускорителей. Электронные ускорители для радиационно-технологических установок (РТУ) разработаны на следующих российских предприятиях:



Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск;



Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург;



Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН г. Новосибирск;



НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ, г. Москва;



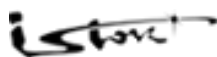
НИЯУ "МИФИ", г. Москва;



ОАО "МРТИ РАН", г. Москва;



ФГУП "НИИЭФА им. Д.В. Ефремова", г. Санкт-Петербург;



ФГУП "НПП "Исток", г. Фрязино;



ФГУП "НПП "Торий", г. Москва;



ФГУП "РФЯЦ "ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина", г. Снежинск;



ФГУП "РФЯЦ "ВНИИ экспериментальной физики", г. Саров;



ФГУП "Исследовательский центр им. М.В. Келдыша", г. Москва.

Ускоритель электронов высоковольтный трансформаторный имеет более высокий КПД (до 95%), чем у резонансных ускорителей, что позволяет создать простые в эксплуатации РТУ мощностью выше 400 кВт в пучке. Однако, создание технологических высоковольтных ускорителей с энергией выше 2,5 МэВ технически не целесообразно из-за высоковольтных пробоев в источнике питания. При использовании в технологиях электронных пучков с энергией выше 2,5 МэВ необходимы волноводные и резонансные ускорители. Параметры промышленных ускорителей для электронно-лучевых технологий приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ускорителей.

№ п/п	тип ускорителя	фирма	W_e МэВ	P_n кВт	источник энергии (P_n, P_{cp})
1	2	3	4	5	6
1.	Синус-200	ИСЭ	0,15÷0,3	2	импульсно-периодический ускоритель с холодным катодом (6 кА, 10 нс, 200 Гц)
2.	УРТ-0,5	ИЭФ	0,5	1	высоковольтный генератор на SOS-диодах (трансформ. масло)
3.	УРТ-1	ИЭФ	1,0	1	высоковольтный генератор на SOS-диодах (трансформ. масло)
4.	ИЛУ-6	ИЯФ	1,7÷2,5	20	ГИ-50А (2 МВт, 40 кВт)
5.	ИЛУ-8	ИЯФ	0,75÷1,0	25	ГИ-50А (2 МВт, 40 кВт)
6.	ИЛУ-10	ИЯФ	4÷5,0	50	ГИ-50А (2 МВт, 40 кВт) 2 шт.
7.	ИЛУ-14	ИЯФ	7,5÷10	100	ГИ-50А (2 МВт, 40 кВт) 5 шт.
8.	ЭЛВ-0,5	ИЯФ	0,4÷0,7	25	ВТ (высоковольтный трансформатор, изоляция -

					элегаз)
9.	ЭЛВ-2	ИЯФ	0,8÷1,5	20	ВТ
10.	ЭЛВ-3	ИЯФ	0,5÷0,8	50	ВТ
11.	ЭЛВ-4 (УЭВТ-1,5-50-Т-160-4)	ИЯФ	1,0÷1,5	50	ВТ
12.	ЭЛВ-6	ИЯФ	0,8÷1,2	100	ВТ
13.	ЭЛВ-8	ИЯФ	1,0÷2,5	100	ВТ
14.	ЭЛВ-12	ИЯФ	0,9÷1,0	400	ВТ
15.	PLA-10-15	НИИЯФ	10	15	КИУ-147А (6 МВт, 25 кВт) КИУ "Белка" (6 МВт, 60 кВт)
16.	У-17	МИФИ	10	1	КИУ-53 (12 МВт, 18 кВт)
17.	У-28	МИФИ	10	2	МИ-262 (9 МВт, 13 кВт)
18.	У-40	МИФИ	2,8	0,2	МИ-242Б (0,5 МВт, 0,5 кВт)
19.	РЭЛУС-1	МИФИ	3,0÷5,0	0,5	МИ-202М (1,6 МВт, 2 кВт)
20.	РЭЛУС-5	МИФИ	3,0÷5,0	1	МИ-456А (2,5 МВт, 3,5 кВт)
21.	СТЕРУС-1	МРТИ	9,5	9	КИУ-15 (20 МВт, 18 кВт)
22.	С-1 (Радуга)	МРТИ	5,5	1,8	МИ-456А (2,5 МВт, 3,5 кВт)
23.	ЭОЛ-400	МРТИ	0,4	10	ВТ
24.	УЭЛР-5-1С	НИИЭФА	5	1	клистрон
25.	УЭЛР-10-10С	НИИЭФА	10	10	КИУ-147А (6 МВт, 25 кВт)
26.	УЭЛР-10-15	НИИЭФА	10	15	VKS-8262F (5 МВт, 36 кВт)
27.	Геза-2	НИИЭФА	0,5	-	500 А в импульсе 250 мкс
28.	ТУР	НИИЭФА	0,1÷0,25	-	ВТ
29.	Аврора	НИИЭФА	0,2÷0,3	20	ВТ
30.	Электрон	НИИЭФА	0,5÷0,75	100	ВТ
31.	Пиксис	Исток	0,18	0,1	ВТ
32.	Электроника У-003	Торий	4÷8	5	МИ-320 (10 МВт, 10 кВт)
33.	Электроника УЭЛВ-10-10	Торий	10	10	МИ-435 (10 МВт, 22 кВт)
34.	Электроника УЭЛВ-10-12	Торий	10	12	МИ-470 (10 МВт, 30 кВт)
35.	Электроника УЭЛВ-10-20	Торий	10	20	МИ-470-1 (10 МВт, 50 кВт)
36.	ИПУЭ	ВНИИТФ	0,2÷0,75	1÷2	высоковольтный генератор на SOS-диодах (трансформ. масло)
37.	ЛУ-6-2	ВНИИЭФ	6	2	МИ-456А (2,5 МВт, 3,5 кВт)
38.	ЛУ-8-2	ВНИИЭФ	8	2	МИ-456А (2,5 МВт, 3,5 кВт)
39.	ЛУ-10-20	ВНИИЭФ	10	10	МИ-328 (6,5 МВт, 20 кВт)
40.	М-13	Центр Келдыша	0,1	40	ВТ (высоковольтный трансформатор)
41.	ТУР-3	Центр Келдыша	0,2	80	ВТ
42.	ОНЕГА	Центр Келдыша	0,3	900	ВТ
43.	Силд Эйр (США)	Силд Эйр	0,5	25	ВТ
гарантированная долговечность (в часах) ► триод: ГИ-50А (1500) ► клистрон: КИУ-15 (2000), КИУ-147А (3000) ► магнетрон: МИ-456А (3000), МИ-470 (2000), МИ-262 (500)					

Внешний вид промышленных ускорителей для электронно-лучевых технологий показан на рис. 1-20. В подписях под рисунками указаны типы ускорителей и в скобках их предприятия изготовители.



Рис. 1. ЭЛВ-8 (ИЯФ СО РАН).



Рис. 2. ЭЛВ-12 (ИЯФ СО РАН).

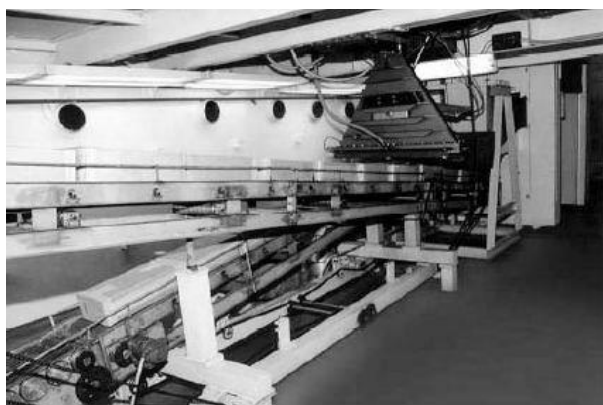


Рис. 3. ИЛУ-8 (ИЯФ СО РАН).

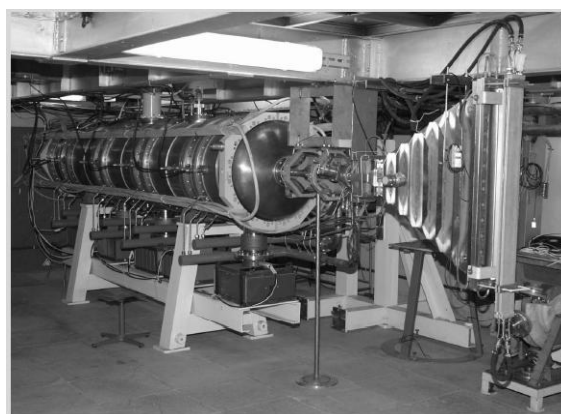


Рис. 4. ИЛУ-14 (ИЯФ СО РАН).



Рис. 5. УЭЛВ-10-10С (НИИЭФА).



Рис. 6. УЭЛР-10-10С (НИИЭФА).

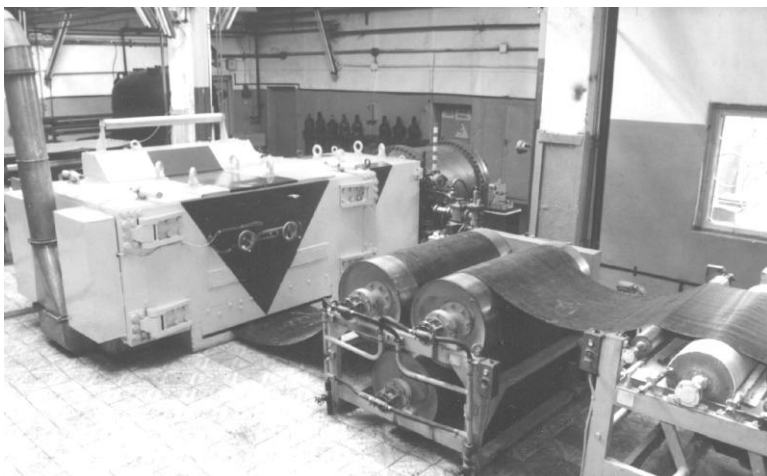


Рис. 7. Электрон-10 (НИИЭФА).

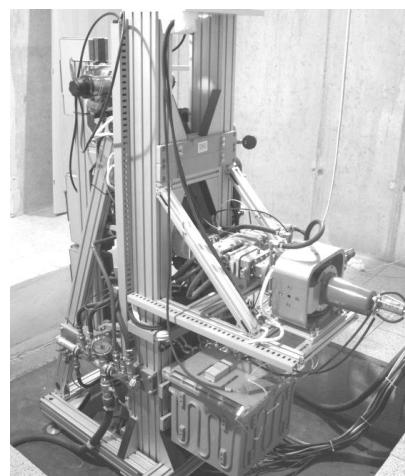


Рис. 8. УЭЛР-5-1С (НИИЭФА).

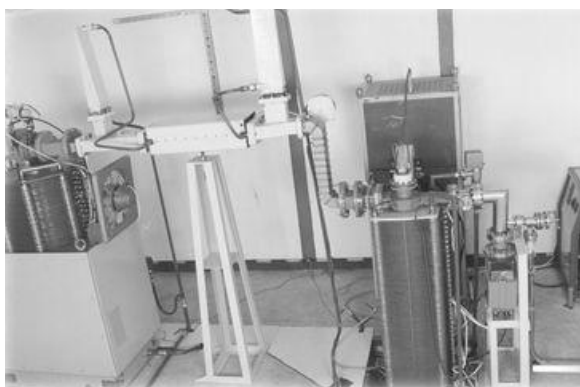


Рис. 9. УЭЛВ-10-10 (Торий).



Рис. 10. УЭЛВ-10-15-С-70 (Торий).



Рис. 11. РАДУГА (МРТИ).



Рис. 12. СТЕРУС-1 (МРТИ).

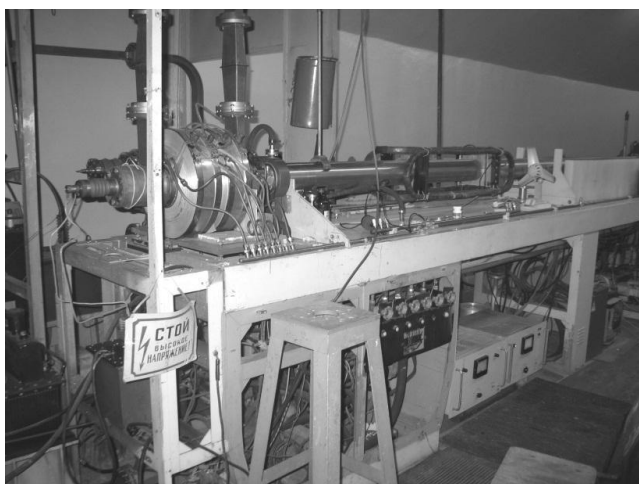


Рис. 13. У-17 (МИФИ).



Рис. 14. РЭЛУС-5 (МИФИ).



Рис. 15. М-13 (Центр Келдыша).



Рис. 16. ОНЕГА (Центр Келдыша).



Рис. 17. Синус-200 (ИСЭ СО РАН).

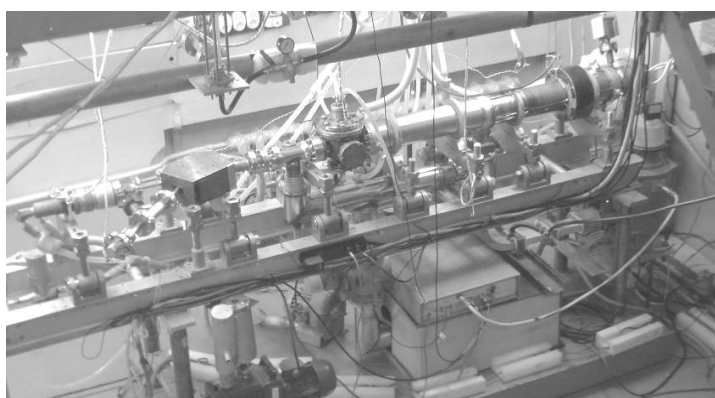


Рис. 18. РЛА-10-15 (НИИЯФ).



Рис. 19. УРТ-0,5 (ИЭФ).



Рис. 20. УРТ-1 (ИЭФ).

Важную роль при выборе ускорителя в составе РТУ следует отдавать источнику энергии. Параметры ВЧ и СВЧ-приборов приведены в таблице 2. Гарантийный срок работы источника энергии, надежность сервисного обслуживания и его цена фактически определяют эксплуатационные расходы. В паспортах источников питания наибольшие гарантийные сроки имеют клистроны (до 3000 часов), затем магнетроны (до 2000 часов) и триоды (до 1500 часов). Усредненная фактическая долговечность приборов, отмеченная в последние годы разработчиками и потребителями существенно выше: триод ГИ-50А (7000÷8000), клистрон КИУ-15 (5000÷6000 час), Клистрон КИУ-147А (3000÷5000 час), магнетрон МИ-470 (6000÷7500 час.). Следует отметить, что дела у разработчиков отечественных приборов улучшились, по сравнению с обвалом "девяностых" годов. Можно констатировать стабильность в работе предприятий "Торий" (Москва), "Исток" (Фрязино), "Контакт" (Саратов), "Фаза" (Ростов-на-Дону), от устойчивой работы которых фактически зависит разработка и эксплуатация отечественных волноводных и резонансных ускорителей. Российские производители СВЧ-приборов предлагают более выгодные условия поставок, чем их зарубежные коллеги из фирм "СРІ МРР" (США) и "Thales" (Франция).

Таблица 2. Параметры ВЧ и СВЧ-приборов.

Тип прибора	f_0 , МГц	$P_{и}$, МВт	$P_{ср}$, кВт	$\tau_{и}$, мкс	U_a , кВ	Изготовитель
Триод ГИ-50А	170	2	40	1000	32	"Контакт", г. Саратов
Магнетрон МИ-328	1818±10	6,6	22	2,2	50	"Торий" Москва
Клистрон КИУ-15	1818	20	18	6,5	280	"Исток", г. Фрязино
Магнетрон МИУ-34	1818	36	120	2	50	"Торий" Москва
Магнетрон МИ-320	1886±3	10	10	5	46	"Торий" Москва
Магнетрон МИ-435	1886±3	10	22	6	46	"Торий" Москва
Магнетрон МИ-470	1886±3	10	30	10	46	"Торий" Москва
Магнетрон МИ-470-1	1886±3	10	50	10	46	"Торий" Москва
Клистрон КИУ-111	2450±4	5	5	7	50	"Торий" Москва
Клистрон КИУ-147	2450±4	5	25	16	50	"Торий" Москва
Клистрон КИУ-53	2797±7	12	18	10		"Контакт", г. Саратов
Магнетрон МИ-456М	2797±5	4	7	10,5	53	"Фаза", г. Ростов- на-Дону
Клистрон КИУ-147А	2856±4	6	25	16	53	"Торий" Москва
Клистрон КИУ-168	2856±4	6	6	7	52	"Торий" Москва
Клистрон "Белка"	2856	6	60	10	120	"Торий" Москва
Клистрон VKS-8262F	2856±2	5	36	16,3	125	СРІ, США
Магнетрон "Бинар"	2995-3005	6	4	4,5	53	"Фаза", г. Ростов- на-Дону
Клистрон VKS-8262E	2998,5±2,5	6	72	10	135	СРІ, США
Магнетрон МИ-262	3200±2	9	13	3,5	53	"Контакт", г. Саратов

Стоимость новых ускорителей в зависимости от их энергии и мощности находится в диапазоне от 10 (1 МэВ, 5 кВт) до 90 (10 МэВ, 100 кВт) млн. руб. Стоимость транспортных систем 5÷25 млн. руб. Проект размещения и строительство помещений РТУ 10÷100 млн. руб. При круглосуточной работе самоокупаемость проекта 5÷10 лет и зависит от мощности РТУ. Временно не работающие ускорители, пригодные для использования в РТУ, находятся в ОАО "ПРИМ" (г. Ижевск), ООО "Нефтепрогрессцентр" (МО, г. Электрогорск); ФИНЭПХФ РАН (МО, г. Черноголовка) и еще на 20 фирмах по всей России. Цена таких ускорителей (с хранения) 1÷3 млн. руб. + 2÷3 млн. руб. стоимость транспортных систем + 5÷10 млн. руб. за перевоз и пуск в эксплуатацию. Имея опыт такого рода работ можно создать РТУ за 20 млн. руб. (срок окупаемости примерно 2 года).

Высокая стоимость РТУ с ускорителями, необходимость приема на работу высококвалифицированных дефицитных специалистов по ускорительной технике и дозиметрии затрудняет создание радиационных центров в отдельных малых и средних предприятиях с частичной загрузкой установок. Экономически оправдана только полная временная загрузка РТУ на предприятиях или в специализированных облучательных центрах (желательно круглосуточная).

Ускоритель является продуктом фундаментальной науки и отдельные продвинутые образцы состоят из более чем 20000 радиоэлектронных комплектующих. Назначенный срок службы ускорителя не менее 10 лет, отдельные образцы находятся в эксплуатации свыше 30 лет. Поэтому чрезвычайно важно со стороны производителя техническое "сопровождение" ускорителей в процессе эксплуатации, обеспечивающее своевременное техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт. Отрадно появление современных сервисных групп у таких производителей, как "ИЯФ" и "НИИЭФА", декларирующих "пожизненное сопровождение" своих установок. При наличии квалифицированного персонала, ускорители, прошедшие своевременное сервисное обслуживание, имеют среднюю наработку на отказ 300÷400 часов при коэффициенте технического использования более 0,9.

Обзор радиационных технологий "девяностых годов" приведен в работе: [1].

В 2013 г. на 55 действующих ускорителях были реализованы более 20 радиационно-технологических процессов (таблица 3):

Радиационно-биологические ►стерилизация изделий медицинского назначения; ►радиационная обработка лекарственного сырья; ►радиационная, радиуризация, радиапертизация пищевых, сельскохозяйственных продуктов, биологически активных добавок к пище; ►предпосевное облучение и радиационная селекция семян; ►радиационная "сшивка" биологически активного вещества с

полимерным носителем для производства лекарств; ►► электронно-лучевая технология производства гелей для использования в медицине и биотехнологии.

Радиационно-химические ►► радиационное модифицирование полимеров, труб, изоляции проводов и кабелей; ►► вулканизация резино-технических изделий, производство искусственных кож и стеклопластиков; ►► отверждение лакокрасочных покрытий; ►► производство радиационно-модифицированных волокнистых плит и древесно-стружечных изделий; ►► радиационно-термический высокотемпературный газофазный синтез сверхчистых реакционных продуктов; ►► радиационное отверждение бетонополимерных материалов.

Радиационно-физические ►► радиационная модификация полупроводниковых приборов, ►► модификация физико-химических свойств кристаллов, драгоценных камней, нанопорошков, ►► поверхностное упрочнение, полировка, легирование металлов, сплавов, керамики; ►► повышение износостойкости, коррозионной стойкости, динамической прочности при электронно-лучевой обработке изделий.

РТУ с ускорителями электронов делает производство инновационным. В результате осуществления радиационно-технологических процессов обработки появляются продукты с новыми свойствами, не достижимыми другими методами.

Таблица 3. Внедренные электронно-лучевые технологии в 2013 г.

№ п/п	Пользователь	ускоритель	Область применения
1	2	3	4
1.	Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск	Синус-200	стерилизация
2.	Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург	УРТ-1 УРТ-0,5	получение нанопорошков
3.	ЗАО "НИИХИТ-2", г. Саратов	УРТ-0,5	модификация тонких органических пленок для аккумуляторов
4.	ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск	ИЛУ-6; ИЛУ-10; ИЛУ-14; ЭЛВ-6; ЭЛВ-12	стерилизация, радиационное модифицирование полимеров, электронно-пучковые технологии
5.	ОАО "Пластполимер", г. Санкт-Петербург	ИЛУ-6; ИЛУ-6	радиационная обработка кристаллизующихся

			полимеров
6.	ОАО "МИПП - НПО "Пластик", г. Москва	ИЛУ-6	радиационное модифицирование полимеров
7.	ЗАО "ЗОЗП", МО, Сергиево-Посадский р-н пос. Заречный	ИЛУ-6	радиационное модифицирование полимеров
8.	ООО "Резонанс Плюс" Ульяновская область, Мелекесский район, промзона № 1	ИЛУ-6	модифицирование изоляции кабелей
9.	ЗАО "Эвалар" Алтайский край, г. Бийск	ИЛУ-6	радуризация лекарственных средств
10.	ОАО "Крон", г. Владикавказ	ИЛУ-6	радиационное модифицирование полимеров
11.	ОАО "Завод "Чувашкабель", ЧР, г. Чебоксары	ИЛУ-8	модифицирование изоляции кабелей
12.	ООО "Русфом", МО, г. Люберцы	ИЛУ-8	модифицирование полимеров (пенополиэтилен)
13.	ФГУП "НИИ графит", г. Москва	ЭЛВ-0,5	радиационная переработка материалов
14.	ФГУП "ИвНИИПИК", г. Иваново	ЭЛВ-2	модифицирование полимерных изделий (искусственные кожи)
15.	ФГУП "НИФХИ им. Л.Я. Карпова" (филиал), г. Обнинск	ЭЛВ-2; ЭЛВ-3; УЭЛР-10-10-Т	Радиационная обработка материалов и изделий, вспененный полиэтилен
16.	ООО "Гефест-Ростов", г. Ростов-на-Дону	ЭЛВ-3; ЭЛВ-3	термоусаживаемые пленки и манжеты для герметизации трубопроводов
17.	ОАО "КЗСК", РТ, г. Казань	ЭЛВ-3	радиационная обработка материалов и изделий (вулканизация резин)
18.	ЗАО "Кавказкабель", КБР, г. Прохладный	УЭВТ-1,5-50-Т-160-4 (ЭЛВ-4)	модифицирование изоляции кабелей
19.	ОАО "НП "Подольскабель", МО, г. Подольск	ЭЛВ-4; ЭЛВ-8	модифицирование изоляции кабелей
20.	ОАО "Экспокабель", МО, г. Подольск	ЭЛВ-2	модифицирование изоляции кабелей
21.	ОАО "УЗЭМИК", РБ, г. Уфа	ЭЛВ-6	радиационная обработка материалов (термоусаживаемая пленка для кровли)
22.	ООО "БИАКСПЛЕН", г. Новокуйбышевск	ЭЛВ-6	Радиационная модификация (термоусаживаемые ленты, манжеты)
23.	ОАО "Искож", г. Киров	ЭЛВ-6	вулканизации искусственных кож, пленочные материалы
24.	ОАО "РОССКАТ", Самарская область,	ЭЛВ-8	модифицирование изоляции кабелей

	г. Нефтегорск		
25.	НИИЯФ МГУ, г. Москва	PLA-10-15	радиационная обработка материалов
26.	НИЯУ "МИФИ", г. Москва	У-17; У-28; У-40; РЭЛУС-1; УЭЛВ-10-10;	радиационная обработка материалов, изделий электронной техники
27.	ФГУ РНЦ "Курчатовский институт", г. Москва	РЭЛУС-5	процессы взаимодействия излучения с веществом
28.	ФГУП "МРТИ РАН", г. Москва	СТЕРУС-1; С-1; ЭОЛ-400	стерилизация, радиационная обработка материалов
29.	ОАО "Синтез", г. Курган	ЛУЭ-8-5С	стерилизация
30.	ЗАО "НПП "Радиопласт-Д", г. Москва	ЛУЭ-8-5С	радиационная модификация пластмасс, тонирование стекла, стерилизация
31.	ИЯИ РАН, г. Москва	ЛУЭ-8-5С	радиационная обработка материалов
32.	ООО "РАД", г. Санкт-Петербург	УЭЛР-10-10; ЛУЭ-8-5С	стерилизация, радиационная обработка материалов
33.	ОАО "ИЗП", УР, г. Ижевск	Аврора	производство радиационно-сшитого пенополиэтилена
34.	ОАО "ТУИР", г. Иваново	Электрон-10	модифицированный гибкий кровельный материал
35.	ФГУП "НПП "Исток", МО, г. Фрязино	Пиксис	поверхностная радиационная обработка изделий
36.	ФГУП НПП "Торий", г. Москва	УЭЛВ-10-10; УЭЛВ-10-10-1	стерилизация
37.	ЗАО "ИНТЕХ", г. Нововоронеж	УЭЛВ-10-10-С-70	стерилизация
38.	ИФХЭ РАН, г. Москва	УЭЛВ-8-20-С-70-1; УЭЛВ-10-15-Т; УРТ-1	стерилизация, радиация, модифицирование полимеров, кристаллов, наноматериалов, полупроводников
39.	ФГУП "НИИП", МО, г. Лыткарино	У-003	стерилизация, обработка полупроводниковых приборов
40.	ОАО "ВНИИТФА", г. Москва	У-003	стерилизация, обработка материалов
41.	ОАО Электровыпрямитель Мордовия, г. Саранск	У-003	обработка полупроводниковых материалов
42.	НИТУ "МИСиС", г. Москва	ЭЛУ-6	обработка материалов (металлы, полупроводники)
43.	ИМЕТ РАН, г. Москва"	ЭЛУ-4	упрочнение металлов электронным пучком
44.	ФГНУ НИИ ИН, г. Томск	ЭЛУ-4	радиационная обработка материалов
45.	ФГУП "Центр Келдыша, г. Москва	М-13 ТУР-3 ОНЕГА	электронно-лучевое упрочнение поверхностного слоя различных материалов
46.	ФГУП "РФЯЦ "ВНИИТФ",	ИПУЭ	радиационная обработка материалов

	г. Снежинск		
47.	ФГУП "РФЯЦ "ВНИИЭФ", г. Саров	ЛУ-6-2 ЛУ-8-2; ЛУ-10-20	стерилизация, радиационная обработка материалов
48.	ФГУ "ВЦППХ РОСЗДРАВА", РБ, г. Уфа	ЛУ-6-2	стерилизация
49.	ООО "ТЕРМА" г. Санкт- Петербург	ускоритель 700 кэВ	радиационно- модифицированные термоусаживаемые ленты, манжеты и муфты
50.	ООО "СФМ-Фарм" Новосибирская обл., рп Кольцово,	ИЛУ-10	радиационный синтез субстанций веществ для фармпрепаратов
51.	ЗАО "Силд Эйр Каустик", г. Волгоград	ускоритель Силд Эйр-0,5- 25	модифицирование полимеров (термоусаживаемая пленка)

Электронно-лучевая стерилизация медицинских изделий, лекарств, лекарственного сырья, косметики и радиуризация пищевых, сельскохозяйственных продуктов и сырья производится непосредственно в транспортных картонных коробах, устанавливаемых на конвейеры и пропускаемых под разверткой ускорителей (Рис. 21).



Рис. 21. Электронно-лучевая стерилизация медицинских изделий, лекарств, косметики и радиуризация пищевых продуктов в транспортных картонных коробах. а - ИФХЭ РАН; б - ЗАО "ИНТЕХ", в - ФГУП "Торий"; г - ОАО "МРТИ РАН";

Электронно-лучевая модификация свойств изделий из пластмасс с использованием ускорителей электронов приводит к повышению термостойкости и твёрдости изделий после радиационной объемной сшивки. Проведенная модификация позволяет получать термоусаживаемые изделия, изоляцию кабельной продукции, труб, сверхпрочные плёнки, оберточных материалов, полимерные покрытия и др.

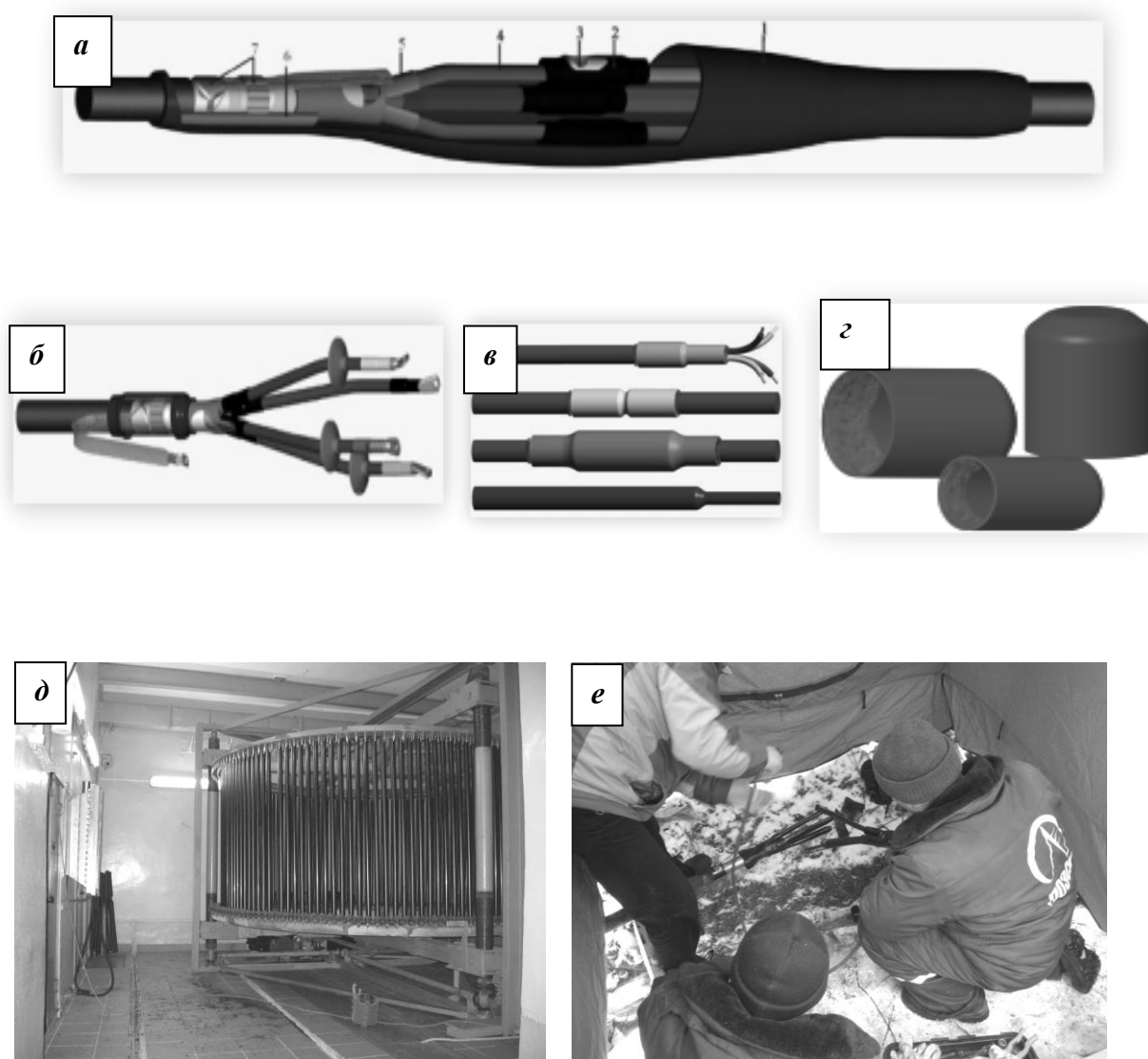


Рис. 22. Электронно-лучевое модифицирование полимеров. *a* - соединительные термоусаживаемые муфты; *б* - концевые термоусаживаемые муфты; *в* - термоусаживаемые изолирующие трубки; *г* - оконцеватели герметизирующие термоусаживаемые; *д* – облучение труб; *е* - монтаж термоусаживаемых муфт.

Применение методик электронно-лучевой обработки и специальных режимов отжига позволяет создавать новые инновационные полупроводниковые материалы и приборы на их основе. Образующиеся при этом радиационные дефекты изменяют электрические свойства кремния подобно центрам рекомбинации, что позволяет улучшить динамические параметры полупроводниковых приборов;

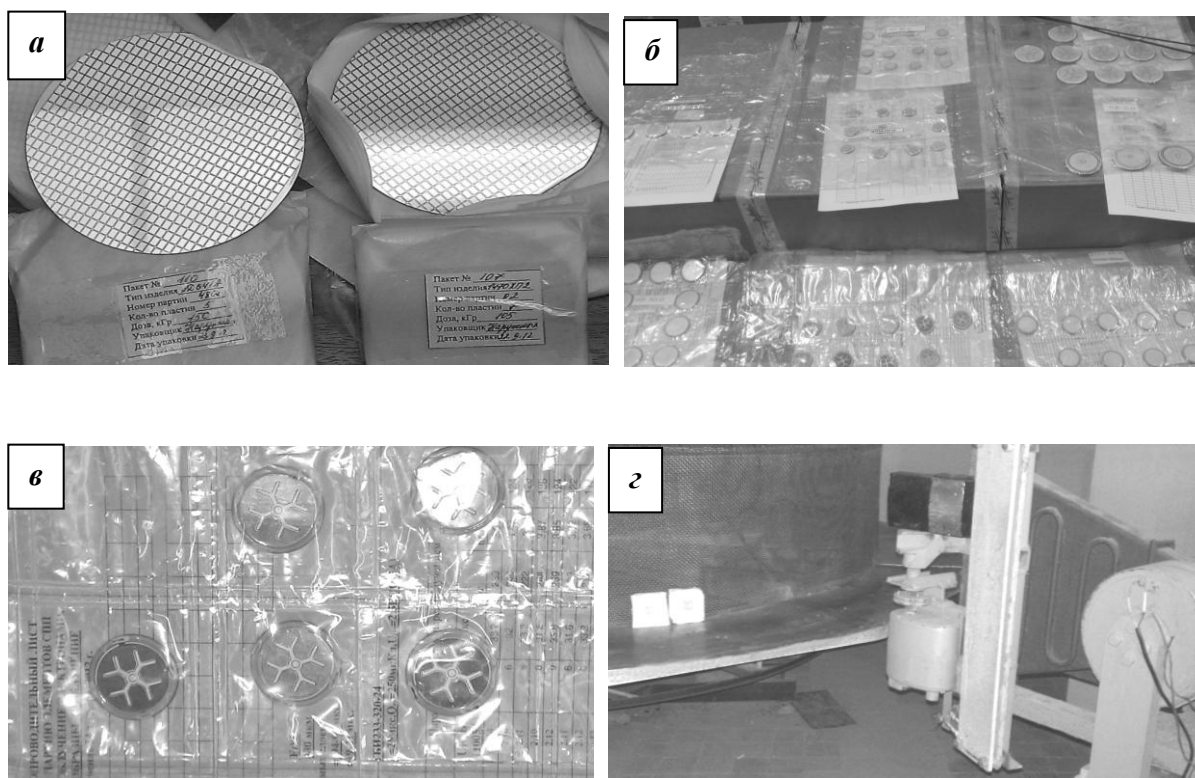


Рис. 23. Электронно-лучевое модифицирование полупроводниковых материалов и приборов. а – полупроводниковые пластины; б,в – полупроводниковые диоды и тиристоры; г – облучение упаковок с полупроводниковыми приборами на ускорителе.

Облучение камней высокоэнергетическими электронами приводит к образованию цветных центров, создавая дефицит (или избыток) электронов в пределах кристаллической структуры. Свободные электроны взаимодействуют с пропускаемым через камни светом и избирательно поглощают определенные спектральные участки. В результате у облученных камней появляются различные цветовые оттенки в видимом диапазоне спектра.

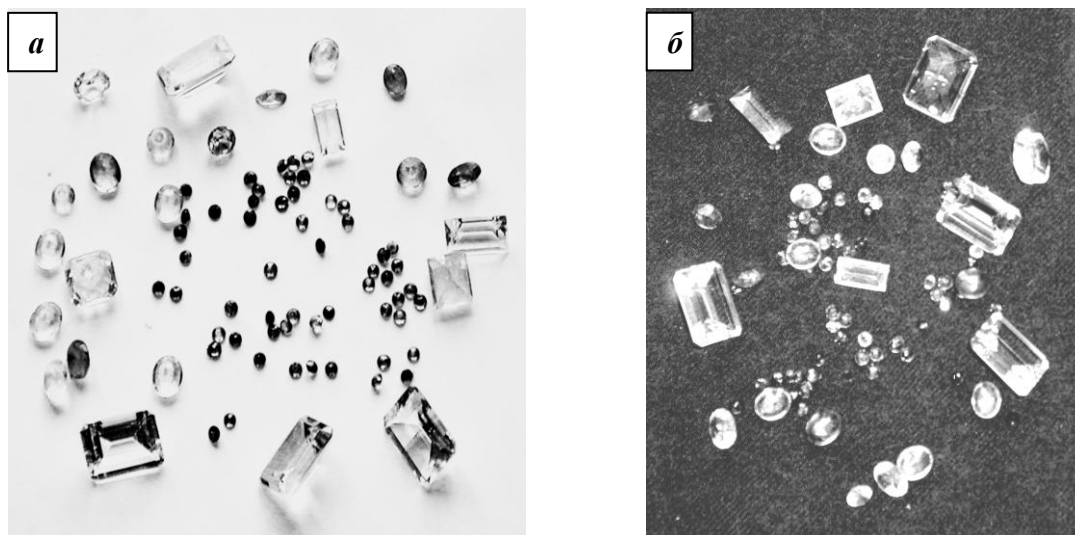


Рис. 24. Модифицированные драгоценные и полудрагоценные камни и минералы, включая топаз, нефрит, жадеит, скаполит, агат, турмалин, кварц, берилл, циркон, алмаз.

Промышленные изделия, изготовленные методами электронно-лучевого модифицирования, радиационно безопасны и не имеют даже естественного фона излучения. Например, в строительстве для создания эффективных радиационных барьеров перспективны модифицированные тормозным излучением волокнистые плиты из отходов древесины и биомассы растений; обладающие высокой прочностью и твердостью стали, низким водопоглощением, малым износом и устойчивостью к агрессивным воздействиям.

Российский опыт внедрения электронно-лучевых технологий показал перспективность и значимость полученных результатов, их важность и финансовую окупаемость. Имеются все предпосылки для дальнейшего продвижения в России инновационных электронно-лучевых технологий для производства продуктов с исключительной потребительской ценностью и сверхвысокими показателями, недостижимыми для других технологий.

1. *Пикаев А.К.* Радиационная химия и технология на рубеже веков. // Химия высоких энергий. 2001. Т. 35. № 6. С. 403-426.

2. *Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Демский М.И., Свиньин М.П.* Современное состояние разработки ускорителей электронов для радиационных технологий. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техническая физика и автоматизация. Вып. 58. М., ЦНИИАтоминформ, 2004, с. 72-56.

3. *Ауслендер В.Л., Безуглов В.В., Брызгин А.А. и др.* Ускорители электронов серии ИЛУ и их использование в радиационно-технологических процессах. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техническая физика и автоматизация. Вып. 58. М., ЦНИИАтоминформ, 2004, с. 78-85.

4. *Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К. и др.* Ускорители серии ЭЛВ и их применение в радиационно-технологических процессах. Вестник «Радтех-Евразия» №1(11), Москва-Новосибирск, 2002, с. 4-7.