

## Радиационные технологии с применением электронного и тормозного излучения

*Н.И.Айзацкий, В.Н.Борискин, А.Н.Довбня, А.И.Зыков, Э.С.Злуницын, С.П.Карасев,  
М.А.Красноголовец, В.А.Попенко, Г.Д.Пугачев, Ю.Д.Тур, В.Л.Уваров, Г.Л.Фурсов*

*ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ, г. Харьков*

В работе дан краткий обзор созданных в Научно-исследовательском комплексе НИК “Ускоритель” ННЦ ХФТИ радиационно-технологических установок с ускорителями электронов, проводимых на них облучательных программ, а также разработанных средств метрологического обеспечения и сопровождения этих программ.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире радиационные технологии относятся к числу наиболее динамично развивающихся. Стоимость продукции, получаемой с применением ионизирующих излучений, составляет десятки миллиардов долларов США в год при ежегодном росте 5-7%. НИК “Ускоритель” ННЦ ХФТИ является единственным в Украине разработчиком ускорителей электронов, технологий с их применением, а также средств измерения и контроля ионизирующих излучений в радиационно-технологических процессах.

### 1. УСКОРИТЕЛИ

За последние 15 лет в НИК “Ускоритель” созданы и эксплуатируются три радиационно-технологические установки (РТУ) с ускорителями ЛУ-10, КУТ и ЭПОС (табл.1) -[1].

Ускоритель ЛУ-10 был сдан в эксплуатацию в 1988 г. [2]. До середины 1993 г. он работал в режиме с одним клистроном КИУ-53, обеспечивая при энергии ускоренных электронов 10МэВ среднее значение тока пучка 500мкА при частоте следования импульсов 150Гц. Ввиду того, что проводимые на РТУ с ускорителем ЛУ-10 производственные процессы требовали более высоких значений энергии электронов и мощности пучка, была разработана и реализована схема ВЧ питания ускорителя, основанная на сложении ВЧ мощности двух клистронов типа КИУ-12 [3]. Прошедший после модернизации период подтвердил надежную работу ускорителя с этим вариантом ВЧ питания. Ускоритель КУТ функционирует с сентября 1993 г. Он разработан как базовый источник излучения для центров

радиационной стерилизации Украины [4]. Особенностью ускорителя является использование специально разработанного ВЧ источника электронов, обеспечивающего значение их энергии на входе в ускоряющую секцию до 300 кэВ. Последняя представляет собой нагруженную дисками волноводную структуру с типом колебаний  $2\pi/3$  при частоте 2797 Мгц.

*Таблица 1*

*Основные параметры ускорителей промышленного назначения*

Параметр	ЛУ-10	КУТ	ЭПОС
Номин.знач. энергии электронов, МэВ	12	10	20
Глубина регулировки энергии, МэВ	8..18	8..14	10..30
Число ускоряющих секций	1	1	2
Длительность импульса пучка, мкс	3.5	4	4
Максимальная частота следов.импульсов, Гц	300	300	150
Среднее значение тока пучка, мкА	1000	800	500
Частота сканирования пучка, Гц	3	3	3
Размеры пучка, см	1x30	1x30	1x30

Ускоритель ЭПОС был создан на основе двух первых секций ускорителя ЛУ-2ГэВ для обеспечения радиационных технологий с энергией ускоренных электронов до 30МэВ [5]. ВЧ питание ускорителя осуществляется двумя клистрономными КИУ-12 АМ. Система контроля параметров ускорителя ЭПОС (равно как и других) основана на использовании компьютера IBM PC/AT.

## 2. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2.1. Стерилизация ионизирующим излучением является одной из наиболее распространенных радиационных технологий. Так, только в США годовая стоимость продукции, подвергаемой радиационной стерилизации составляет более 10 млрд.долл. при постепенном вытеснении химической стерилизации. Преимуществами радиационной обработки продукции (для этого применяется как электронное, так и тормозное излучение) является более высокая экологическая безопасность, низкая стоимость, а сам продукт после обработки, при условии соблюдения технологического регламента, является нетоксичным.

На базе ускорителя ЛУ-10 преимущественно для задач стерилизации была создана РТУ с транспортной системой, обеспечивающей дистанционную доставку изделий в зону облучения. К настоящему времени на этой установке накоплен большой опыт по стерилизации промышленных партий различных одноразовых изделий медицинского назначения: шприцев, игл к ним, систем переливания крови, бинтов, кетгута и т.д. При стерилизационной дозе 25 кГр производительность РТУ составляет не менее 15 т продукции в сутки. Разработаны также проекты специализированных стерилизационных центров на базе ускорителя КУТ в Белгороде-Днестровском, Славянске и Запорожье с плановой производительностью не менее 200 млн. шприцев в год каждый.

2.2. Модификация полупроводниковых изделий и материалов позволяет существенно улучшить их временные характеристики. При воздействии на полупроводник потоком ускоренных электронов в его кристаллической решетке образуются радиационные дефекты, в результате чего в запрещенной зоне появляются дополнительные рекомбинационные уровни. На них захватываются неравновесные носители заряда и время их жизни уменьшается.

В частности, при радиационной обработке тиристоров происходит уменьшение времени их выключения  $t_{\text{вык}}$ . Вместе с тем, одновременно ухудшается основной статический параметр тиристора – возрастает величина прямого падения напряжения  $U_{\text{пр}}$ . В результате проведенных экспериментальных исследований был установлен диапазон значений переноса электронов на поверхности полупроводника ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ), обеспечивающий снижение  $t_{\text{вык}}$  более чем на порядок величины при приемлемом росте  $U_{\text{пр}}$  в 2-3 раза [5].

Технологическая обработка полупроводников производится на ускорителе ЛУ-10 при энергии электронов не более 10МэВ, что обеспечивает отсутствие в выпускаемых изделиях наведенной активности. Только за период 1992-95г.г. таким образом было обработано более 75 тыс. кремниевых пластин.

2.3. Радиационная обработка изделий из полиэтилена (ПЭ) приводит к увеличению его молекулярного веса и возрастанию температуры плавления, а также появлению эффекта “памяти”. Последний состоит в том, что изделие, обработанное электронным или  $\gamma$ -излучением дозой 50...150кГр (в зависимости от марки ПЭ) и растянутое под давлением, после нагрева возвращается в исходное состояние (термоусадка).

В современной электротехнике для изоляции силового кабеля широко используются термоусаживающиеся муфты из ПЭ. Исходным материалом для их производства является ПЭ трубка диаметром 10...40 мм, выпускаемая заводом-изготовителем в виде катушек весом до 40 кг. Исследования показали, что наиболее приемлемым видом излучения для обработки такой продукции являются  $\gamma$ -кванты, т.к. ввиду их большой проникающей способности удается обеспечить неоднородность распределения поглощенной дозы для изделий толщиной до 17 г/см<sup>2</sup> при  $E(=10 \text{ МэВ})$  не более 30%. При этом отсутствует характерный для электронного излучения эффект накопления пространственного заряда в ПЭ, приводящий в определенных условиях к перфорации изделия.

В условиях сильноточного ускорителя электронов ряд радиационных процессов сопровождается высоким уровнем тормозного излучения от мишени. Это обстоятельство позволяет проводить одновременно два технологических процесса на первичном и вторичном пучках. Так, на ускорителе ЭПОС создан участок радиационной модификации ПЭ в поле тормозного излучения. В условиях круглосуточной работы ускорителя и величине поглощенной дозы в ПЭ 150 кГр производительность участка составляет до 1 т продукции в месяц.

2.4. Радиационная регенерация вторсырья резины является одним из перспективных и важных для экологии направлений радиационных технологий. В настоящее время из отходов резины на основе бутилкаучука разработано производство регенерата, используемого в качестве сырья при изготовлении строительных гидрозащитных и герметизирующих материалов, кровельных рулонных материалов, а также в производстве шин и резинотехнических изделий. На ускорителе ЛУ-10 создана технологическая линия для радиационной обработки вторсырья резины производительностью до 5 т в сутки.

## 3. СИСТЕМА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для осуществления радиационных технологий необходимо обеспечить контроль основных параметров полей излучения. НИК “Ускоритель” совместно с ГП “ВНИИМ им. Д.И.Менделеева” (г.С-Петербург, Россия) и ГНПО “Метрология” (г.Харьков,

Украина) на протяжении последних 10 лет проводит разработку систем измерения в указанной области [6]. В рамках этой программы создан ряд образцовых средств измерения и технологических измерительных каналов основных параметров электронного и тормозного излучения (таб.2).

Для комплексной непрерывной диагностики сканируемого пучка электронов 10-киловатного диапазона разработан измерительный канал в составе первичного преобразователя в виде тонкой магнитоакустической линии и соответствующего приборного комплекса [7].

**Таблица 2**

Основные параметры контроля полей излучения в радиационно-технологических процессах

Параметр	Диапазон значений
<b>Электронное излучение</b>	
Поток энергии (мощн. пучка), Вт	102...105
Плотн. потока энергии, Вт.м-2	105...107
Поток частиц, с-1	1012...1015
Плотн. потока частиц, м-2с-1	1015...1018
Энергия электронов, МэВ	5...50
Геометрические размеры поля электронного излучения, мм	30...500
Энергетический спектр электронного излучения в диапазоне энерг. электр., МэВ	6...20
Мощность поглощенной дозы электронного излучения, Гр/с	2.101...2.5.104
<b>Тормозное излучение</b>	
Поток энергии, Вт	10-4...103
Плотн. потока энергии, Вт.м-2	5.10-2...106
фотонного излучения с энергией фотонов, МэВ	1...50

Проведено метрологическое исследование разработанных средств измерения как методом прямых измерений в соответствующих полях излучений, так и методом компьютерного моделирования процессов взаимодействия излучения с первичными измерительными преобразователями [8]. По результатам этих исследований на средства измерений оформлены аттестационные свидетельства.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный в НИК "Ускоритель" ННЦ ХФТИ парк сильноточных ускорителей электронов, а также система измерения и контроля параметров

электронного и тормозного излучений позволили создать ряд радиационных технологий, обеспечивающих потребности различных отраслей народного хозяйства Украины. Помимо упомянутых, в настоящее время ведется разработка экологически безопасной технологии производства короткоживущих изотопов для ядерной медицины, в первую очередь, технеция-99m, производительностью до 1 Ки по материнскому изотопу (молибден-99) в сутки [9], а также короткоживущих изотопов для позитрон-эмиссионной томографии. Разработаны также методы активационного анализа образцов руд массой до 1 кг на содержание золота и редких металлов (с точностью определения 0.01...1 грамм на тонну при производительности до 100000 анализов в год) [10], а также анализа радиоактивных элементов. Ведется разработка проекта комплекса радиографического таможенного контроля крупногабаритных грузов с применением тормозного излучения ускорителя электронов.

### Литература

1. A.N.Dovbnya, M.I.Ayzatsky, Ye.Z.Biller et al. Bull.Amer.Phys.Soc.,1997,v.42,N3, p.1391
2. Ю.В.Авдеев и др.ВАНТ,сер.ФРПиРМ,1986, вып.1(38),с.89-91.
3. V.I.Beloglasov et al.Proc.V Europ.Part Accel. Conf.EPAC-96,1996,v.1.p.798-800.
4. M.I.Aizatsky et al. Proc. XIV Part. Accel. Workshop, Protvino,1994,v.4,p.259.
5. Г.Д.Пугачев и др. ВАНТ,сер.ЯФИ,вып.1(28), с.7-13.
6. V.L.Uvarov et al. Bull.Amer.Phys.Soc.,1997, v.42, N3, p.1367.
7. S.P.Karasyov et al. Proc. V Europ. Part. Accel. Conf. EPAC-96, 1996, v.2, p.1678-1679.
8. С.П.Карасев,С.В.Марехин,В.Л.Уваров, И.И.Цветков.ВАНТ,сер.ЯФИ,вып.4,5(31,32),с.72-74.
9. Н.П.Дикий,А.Н.Довбня и др. ВАНТ, сер.ЯФИ, вып.4,5(31,32),с.165-167.
10. Н.П.Дикий,А.Н.Довбня и др. Тезисы докл. Междунар. XLVII Совещ. по ядерн. спектроскоп. и структ. атомн. ядра. Обнинск, 10-13 июня 1997, С.-Петербург, 1997,с.314.

Статья поступила: в редакцию 25 мая 1998 г. ,  
в издательство 1 июня 1998 г.