ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2002-25
ОРИ, ОУ У-70

Л.М. Александров**, А.Г. Алексеев *, А.Н. Асписов **, В.Т. Баранов*,
Г.И. Бритвич *, Н.Н. Ярыгин*

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

* ИФВЭ (г. Протвино)
**ВНИИА (г. Москва)

Протвино 2002

УДК 539.1.074.3 М-24

Аннотация

Александров Л.М., Алексеев А.Г., Асписов А.Н. и др. Радиационная стойкость некоторых элементов и электронных узлов оборудования ускорителя: Препринт ИФВЭ 2002-25. – Протвино, 2002. – 12 стр., 6 рис., 8 табл., библиогр.: 9.

Приводятся результаты по определению радиационной стойкости различных типов диодов, тиристоров, транзисторов, микросхем и отдельных электронных модулей на ускорителе У-70. Проведено сравнение воздействия излучения У-70 и реактора на биполярный транзистор.

Abstract

Alexandrov L.M., Alexeev A.G., Aspisov A.N. et al. Radiation Hardness of Some Elements and the Electronic Modules of Equipment on Accelerators: IHEP Preprint 2002-25. – Protvino, 2002. – p.12, figs. 6, table. 8, refs.: 9.

The results on radiation hardness of the different types of diodes, thyristors, transistors, chips and some electronic modules measured on the U-70 accelerator are presented. Comparison of the radiation effects on the bipolar transistor between U-70 and reactor is discussed.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2002

Введение

При эксплуатации протонного синхротрона имеют место потери пучка протонов, что приводит к возникновению радиационного поля вторичных частиц и облучению оборудования ускорителя. Значительная часть радиоэлектронной аппаратуры различных технологических систем ускорителей, в том числе и У-70, находится вблизи кольцевого электромагнита и подвергается воздействию высокоэнергетичного излучения. Радиационные нагрузки на оборудование ускорителя неравномерны по периметру ускорителя и особенно высоки вблизи систем вывода, перевода и аварийного сброса пучка. В целом, потери на ускорителе имеют квазистационарный характер, однако в отмеченных системах они носят импульсный характер в течение временного интервала, характерного для работы систем вывода пучка.

Радиационная стойкость радиоэлектронной аппаратуры определяется большим числом факторов и прежде всего зависит от энергетического спектра и состава излучения, уровней облучения, а также от выбора элементной базы. В данной работе приводятся результаты испытаний по облучению отдельных типов диодов, транзисторов, тиристоров и микросхем. Проведено сравнение воздействия спектра частиц, образующихся на внутренних мишенях У-70, и нейтронного излучения реакторного спектра на параметры одного из типов биполярного транзистора. Следует отметить, что выполнение данной работы первоначально проводилось применительно к проектируемым системам УНК, поэтому мы также привели результаты испытания отдельных модулей электроники, разработанных для УНК. Целесообразно также подчеркнуть, что исследования по радиационной стойкости электронных компонентов и различных материалов являются актуальными и проводятся в настоящее время как на У-70, так и на других ускорителях.

1. Спектральный состав излучения

В настоящее время накоплен большой объем экспериментальных данных по радиационной стойкости различных элементов радиоэлектроники. В основном эти данные получены при облучении нейтронами на ядерных реакторах. Протонные синхротроны характеризуются энергетическими и временными параметрами вторичных радиационных полей, существенно отличающихся от нейтронного излучения реакторов. Поэтому актуальным становится проведение на ускорителе испытаний по определению радиационной стойкости изделий в реальных или близких к ним условиям.

При проектировании УНК были приняты специальные меры для минимизации азимутального распределения потерь пучка с помощью системы локализации потерь и каналов аварийного сброса. В соответствии с расчетными данными [1] 28 функциональных участков разделены на 5различных групп по уровням облучения оборудования в соотношении 25:7,5:5:2,5:1. У стенок туннеля ожидаемая годовая поглощенная доза составляет от 20 до 150 крад/год. Применение специальных шурфов диаметром 200 мм и глубиной 4 м для раз-

мещения в них первичных модулей электроники существенно облегчает решение вопросов по надежности работы аппаратуры. Так, в шурфах на глубинах 3 и 4 м ослабление потока вторичных частиц составляет 140 и 720 раз соответственно.

Обмотки магнитов и линз находятся в области ядерно-электромагнитного каскада. Однако, как следует из расчетных данных по спектрам утечки адронов с боковой поверхности дипольных магнитов [1], компонентный состав излучения в местах расположения оборудования вблизи стенок туннеля определяется нейтронной компонентой, заряженными частицами (протонами и пионами) и фотонами. Вклад в интегральный поток нейтронов с E > 10 МэВ составляет ~ 90%, вклад протонов и пионов равен ~4 и ~6% соответственно. Следует отметить [1], что в интервале первичной энергии протонов 70-3000 ГэВ спектральный состав излучения за толстой защитой слабо зависит от энергии протонного пучка.

Необходимо отметить, что вклад для разных компонентов излучения не пропорционален флюенсу. Радиационное воздействие также не пропорционально поглощенной дозе или флюенсу для разных видов излучения. Поэтому возможность использовать имеющиеся данные при облучении радиоэлектронных компонентов на реакторах для оценки радиационной стойкости этих элементов к случаю ускорителей требует специального рассмотрения. Одной из целей настоящей работы является сравнение изменений параметров некоторых типов полупроводниковых элементов при облучении их на ускорителе У-70 и на ядерном реакторе.

2. Радиационные эффекты в полупроводниках

В соответствии с ГОСТ 18298-79 под радиационной стойкостью изделия понимается свойство аппаратуры, изделий и материалов выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после действия излучения. При проектировании и разработке аппаратуры для ускорителей необходимо обеспечить работоспособность аппаратуры в течение 5-10 лет. На этапе проектирования существенное значение имеет выбор соответствующей элементной базы с последующим испытанием отдельных элементов и разработанных узлов в радиационных полях ускорителя.

При взаимодействии излучения с веществом полупроводника возникает большое число радиационных эффектов. Принято выделять радиационные эффекты смещения, переноса заряда и ионизационные. Эффекты смещения представляют собой перемещение атомов из своего нормального положения в кристаллической решётке материала. С учетом данных по спектру вторичного излучения ускорителя основным типом радиационных эффектов является смещение атомов из узлов кристаллической решетки полупроводника, вызываемое адронной компонентой излучения. Радиационные дефекты возникают вследствие появления в запрещенной зоне полупроводника дополнительного спектра энергетических уровней из-за отмеченных эффектов смещения или других радиационных эффектов. Простейшие дефекты могут релаксировать через некоторое время после прекращения излучения, однако сложные дефекты существуют в течение длительного времени. Облучение нейтронами и адронами с энергией E >10 МэВ обычно сопровождается появлением кластеров, обусловленных движением по кристаллу первичных атомов и возникновением так называемых областей разупорядочения с большим числом дефектов. Эффекты переноса заряда существенны для импульсных радиационных полей. Влияние γ-излучения на процесс образования структурных дефектов для протонных синхротронов существенно меньше по сравнению с адронами.

Как известно, полупроводниковые материалы характеризуются собственной проводимостью i-типа, электронной и дырочной проводимостью и соответствующими энергетическими уровнями в зоне кристаллической решетки. Появление дополнительных уровней приводит к изменению концентрации основных носителей заряда, их подвижности, удельного сопротивления и времени жизни носителей. Основной причиной изменения параметров полупро-

водниковых приборов, работающих по принципу собирания неосновных носителей, является увеличение скорости объёмной рекомбинации или уменьшение времени жизни неосновных носителей, их концентрации и подвижности, что приводит к снижению эффективности собирания носителей зарядов p-n переходом. Зависимость времени жизни неосновных носителей в биполярных транзисторах от дозы описывается следующим соотношением [2]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \eta \cdot D \ , \qquad (1)$$

где τ_0 – начальное время жизни неосновных носителей до облучения; D – поглощенная доза; η – коэффициент радиационного повреждения, определяющий скорость изменения жизни неосновных носителей при облучении. Для неизменного спектра частиц одного типа этот коэффициент считается постоянным.

Результаты, приводимые в литературе [3], свидетельствуют, что радиационная стойкость лучших полупроводниковых образцов достигает уровней 10^{15} нейтр/см^2 по флюенсу нейтронов и 10^7 рад по поглощенной дозе для γ-излучения. Эти результаты достигнуты на специальных элементах и близки к предельным возможностям кремния. Радиационная стойкость применяемых при разработке аппаратуры промышленных полупроводниковых элементов на два или более порядка меньше этой величины.

В биполярных транзисторах наиболее слабой в радиационном отношении является база. Высокая радиационная стойкость высокочастотных транзисторов объясняется малой толщиной базы и высокой концентрацией легирующих примесей. И наоборот, низкочастотные сильноточные транзисторы, тиристоры, оптотранзисторы, pin-диоды имеют "большой" объём чувствительного к воздействию излучения элемента полупроводника вследствие широкой базы и, соответственно, низкую радиационную стойкость. Микросхемы на основе биполярной технологии (ТТЛ, ЭСЛ) характеризуются более высокой радиационной стойкостью по сравнению с полупроводниковыми структурами на основе МДП технологии, где деградация основных параметров происходит вследствие возникновения в диэлектрике положительного заряда и изменения плотности поверхностных состояний. Поэтому для работы в условиях радиационных полей ускорителей предпочтительно применение элементов биполярной технологии.

3. Облучательский стенд

Наибольшие радиационные нагрузки на оборудование У-70 достигаются в месте расположения внутренних мишеней [4, 5]. Вблизи 27-го блока в районе трех мишенных станций в плоскости орбиты пучка была установлена специальная подставка для размещения электронных модулей и проложены кабельные коммуникации в измерительный домик с регистрирующей аппаратурой. Место расположения облучательского стенда определялось возможностью получения максимальных доз в сеансе работы ускорителя. Эти эксперименты на стенде не требовали выделения специального времени и проводились одновременно с другими работами при выводе пучка на физические эксперименты. Вблизи испытываемых электронных модулей для измерения уровней излучения была установлена ионизационная камера. Для определения полной дозы и калибровки ионизационной камеры устанавливались пленочные дозиметры типа СО ПД(Ф) [5]. Эти дозиметры разработаны на основе целлофановых пленок, оптическая плотность которых меняется в зависимости от поглощенной дозы. В некоторых случаях применялись полиэтиленовые детекторы [6]. Оценка вклада нейтронов осуществлялась на основе расчетных данных, при этом принималось, что дозиметры СО ПД(Ф) чувствительны в основном к заряженному компоненту излучения и фотонам. Контроль за изменением параметров различных электронных модулей осуществлялся во время всего сеанса.

Наряду с облучением электронных модулей проводилось испытание отдельных образцов в пассивном состоянии в различных точках от мишени в том же телесном угле. При этом доза, получаемая отдельными образцами транзисторов и микросхем, также определялась дозиметрами СО ПД(Ф). Геометрия расположения аппаратуры и образцов на облучательском стенде приведена на **рис. 1**. В **табл. 1** приведено характерное распределение доз в течение одного сеанса работы ускорителя. В точке №5 образцы устанавливались ниже уровня вакуумной камеры до 2 м. В некоторых случаях образцы устанавливались перед мишенью.

Таблица 1

№	1	2	3	4	5
D/Мрад./	15	1,6	0,7	0,3	0,1

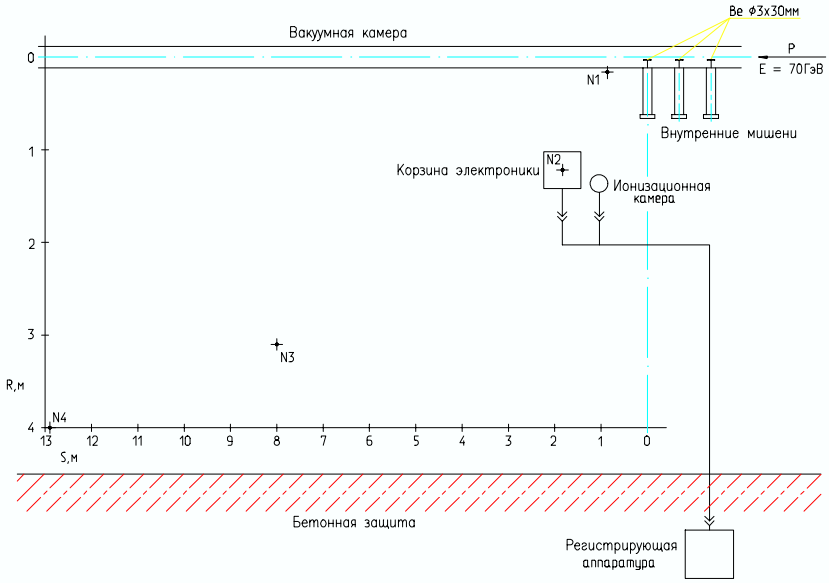

Рис. 1. Геометрия расположения облучаемых образцов на стенде в 27 пп.

4. Облучение транзисторов на импульсном реакторе и ускорителе У-70

Как известно, радиационная стойкость многих радиоэлектронных компонент определена при облучении нейтронами на ядерных реакторах. Представляет интерес сравнение воздействий излучения на один и тот же элемент при облучении на реакторе и ускорителе. В основе некоторых методик для определения потоков нейтронов лежит измерение радиационно-чувствительного параметра транзистора. Изменение этого параметра линейно связано с количеством дефектов, производимых нейтронами в материале полупроводника [7].

В качестве реперных детекторов обычно используются кремниевые транзисторы. Радиационно-чувствительным параметром является динамический коэффициент усиления транзистора β, изменение обратной величины которого линейно связано с потоком нейтронов F_n [7]

$$\frac{1}{\beta+1}-\frac{1}{\beta_0+1}=\alpha\cdot F_n, \qquad (2)$$

где α – коэффициент пропорциональности (чувствительности), который зависит от спектра нейтронов. Учитывая, что поглощенная доза на ускорителях в основном формируется за счет нейтронного и протонного излучения, было решено при исследованиях радиационной стойкости комплектующих элементов на ускорителе также использовать подобную методику.

В данной работе не ставилась цель строгого определения коэффициента перехода доза/флюенс, а была предпринята попытка связать стандартную, принятую в ИФВЭ методику измерения поглощенной дозы [5] с изменениями радиационно-чувствительного параметра транзистора β при воздействии различных доз на У-70 и при определении изменения этого параметра для такого же типа транзистора при облучении на ядерном реакторе. Очевидно, что отношение этих эффектов, выраженных в виде коэффициента К, будет меняться при изменениях спектрального состава излучении. Однако знание такого коэффициента полезно при предварительном анализе радиационной стойкости биполярных транзисторов и, с некоторыми оговорками, микросхем на их основе (ТТЛ, ЭСЛ).

В качестве детектора излучения с учетом прогнозируемого уровня потоков адронов был выбран биполярный транзистор 2Т316Б. Две группы транзисторов по 5 штук облучались в 27 пп У-70 вблизи мишенных станций в точках №2 и №3 в соответствии с геометрией, представленной на рис. 1. Измерение коэффициента усиления β проводилось до и после облучения. В последующих сеансах эти транзисторы облучались повторно. Полученные результаты представлены на **рис. 2**. Доза в каждом сеансе определялась, как отмечалось, с помощью дозиметров СО ПД(Ф).

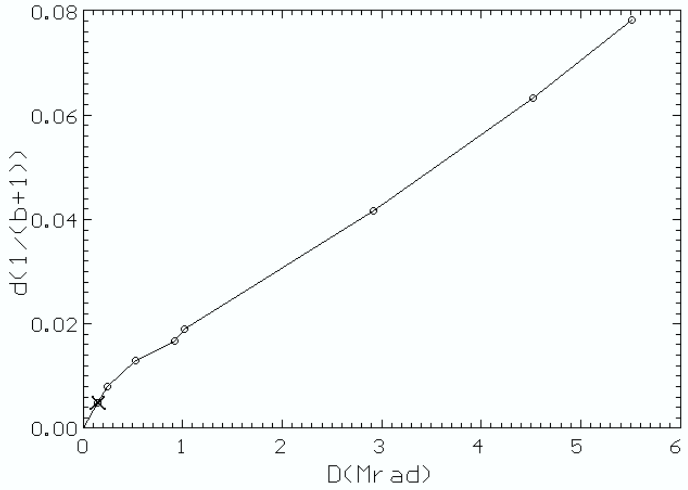

Рис. 2. Зависимость изменения параметра транзистора 2Т316Б по соотношению (2) от дозы: x – реактор, o – ускоритель.

Десять транзисторов 2Т316Б из этой же партии облучались на импульсном реакторе при флюенсе $F_n = 5 \cdot 10^{13}$ нейтр/см^2. Для этой группы транзисторов также проводилось измерение величины β до и после облучения. Полученные результаты представлены на **рис. 2**. Из рис. 2 следует, что отношение дозы У-70 к флюенсу реактора составляет $K = 3 \cdot 10^{-9}$ рад·см^2/нейтр. Для полиэтиленового дозиметра [6] эта величина составляет $K = 4 \cdot 10^{-9}$ рад·см^2/нейтр. Предполагалось, что связь между дозой и флюенсом может определяться соотношением

$$D \approx K \cdot F . \qquad (3)$$

Необходимо отметить, что эта связь очень условная. Так, измеренная дозиметрами доза в основном определяется заряженными частицами и фотонами, а радиационный эффект в транзисторах – быстрыми нейтронами, спектр которых существенно отличается от реакторного спектра. Таким образом, соотношение (3) определяет, при какой дозе смешанного излучения на ускорителе и при каком интегральном потоке нейтронов на реакторе радиационный эффект в транзисторе будет один и тот же (для данных условий облучения на ускорителе).

В работе [8] проведены расчеты дозовых характеристик кремния для различных типов вторичного излучения, в том числе и данные по спектру частиц в точке №2 (рис. 1). В **табл. 2**

приведены эти расчетные данные для нейтронов реакторного спектра и вторичных частиц из бериллиевой мишени У-70.

Таблица 2

	Частица	Е/МэВ	Доза /рад см^2/ частицу	Флюенс	Вклад в дозу в точке №2
Реактор. [8]	n	1,07	$5{,}4 \cdot 10^{-11}$		
У-70 27пп [8]	n	170	$(1\text{-}1{,}5) \cdot 10^{-10}$	96-97%	7-8%
	p		$2\ 10^{-9}$	1,3%	75%
	π			2%	16%

В соответствии с данными таблицы доза для реакторного спектра, создаваемая флюенсом $F = 5 \cdot 10^{13}$ нейтр/см^2, составляет D = 2,7 крад. С учетом оценки на тот же радиационный эффект в точке №2 поток нейтронов составляет $F_n = 2{,}5 \cdot 10^{13}$ нейтр/см^2 или $F_{адр} = 3 \cdot 10^{13}$ адр/см^2. Согласно рис. 2 доза, определенная в точке №2 по показаниям дозиметров, составляет 150 крад. Столь большое различие можно объяснить существенным вкладом в дозу заряженных частиц вследствие ионизационных потерь в веществе дозиметра и, как уже отмечалось, определяющим вкладом быстрых нейтронов в изменение радиационно-чувствительного параметра транзистора β. Использовать соотношение (3) можно только для оценки флюенса нейтронов в месте облучения, так как только нейтроны в основном определяют радиационное воздействие, а доза по показаниям дозиметров определяется, как было сказано, заряженными частицами. Отметим, что косвенным подтверждением данного предположения являются результаты испытаний по радиационной стойкости отдельных элементов и электронных модулей, приведенных в следующем разделе, поскольку уровни устойчивости в дозовом эквиваленте оказались значительно более высокими, чем ожидалось. Хотелось бы отметить, что полученные экспериментальные данные по сравнению радиационного воздействия нейтронов реакторного спектра и спектра нейтронов вблизи мишеней в 27 пп не противоречат теоретическим расчетам, выполненным в [8], где показано, что для оценки эффективного радиационного воздействия нейтронов на ускорителе по сравнению с реактором можно использовать коэффициент 2-7.

5. Облучение отдельных полупроводниковых элементов

По системам УНК, разработанным в ИФВЭ или поставляемым внешними организациями, были проведены испытания по определению радиационной стойкости аппаратуры. На облучательском стенде в 27 пп испытывались отдельные модули и компоненты системы диагностики пучка, вакуумной системы и криогенной системы. Некоторые элементы криогенной системы испытывались на γ-стенде. Однако из-за отсутствия заметных отклонений измеряемых параметров в дальнейшем облучение на стенде с изотопными источниками не проводились. Наряду с образцами 2Т316Б одновременно в разных точках в соответствии с рис. 1 и табл. 1 облучались некоторые различные образцы при определении дозы с помощью дозиметров СО ПД(Ф). Контроль различных параметров полупроводниковых изделий осуществлялся до и после облучения.

Как правило, выбранные для облучения элементы присутствовали в модулях радиоэлектронной аппаратуры различных технологических систем ускорителя. Испытывались следующие полупроводниковые изделия:

Диоды

КЦ402Е, КД213А применяются в системах диагностики пучка и шкафах постов предварительной откачки ШС ППО вакуумной системы (испытывались по 3 образца, D = 0,9 Мрад). Наблюдались существенные изменения прямых вольтамперных характеристик

диодов в выпрямительных мостах КЦ402Е. В реальных схемах эти мосты могут оказаться неработоспособными, или облучение приведет к резкому сокращению сроков службы при токовых нагрузках, значительно ниже номинальных. Изменения обратных ветвей вольтамперных характеристик этих диодов оказались несущественными.

Прямые ветви вольтамперных характеристик диодов КД213А изменились слабо, прямое напряжение у всех образцов после облучения уменьшилось на 2-3% в диапазоне токов от 0 до 1А. Обратные ветви характеристики изменились незначительно. Диоды при таких дозах сохранили свою работоспособность. Для диодов КД213А воздействие указанной дозы оказалось незначительным, и эти диоды целесообразно применять в источниках питания. Результаты испытаний приведены в **табл. 3** Приложения.

Проводились испытания p-i-n диодов типа КА528. В **табл. 4** приведено изменение значений прямого напряжения p-n перехода p-i-n диодов при различных дозах облучения. Изменение обратной ветви характеристики не обнаружено. Эти диоды критичны к воздействию излучения при дозах выше 0,2 Мрад. Диоды предполагалось использовать в системе диагностики пучка, и от их применения в дальнейшем отказались.

Транзисторы

Транзисторы типа КТ3102 и КТ3107 применяются в вакуумной системе и в системе диагностики пучка. При дозе 0,9 Мрад имеет место значительное снижение коэффициента усиления β. Измеренные параметры транзисторов указаны в **табл. 5** Приложения.

Микросхемы

Проводились испытания некоторых типов цифровых и аналоговых интегральных микросхем, используемых в различных модулях технологических систем УНК, при разных дозах облучения. Результаты измерений для цифровых микросхем на основе биполярной технологии 1500 и 555 серии приведены в **табл. 6** Приложения. Как видно из таблицы, микросхемы этих серий достаточно устойчивы к воздействию излучения. Результаты измерений для цифровых микросхем 561 серии на основе МДП-технологии приведены в **табл. 7**. Сравнение табл. 6 и 7 показывает, что микросхемы на основе биполярных технологий испытанных серий имеют существенные преимущества по сравнению с 561 серией.

Проводилось также испытание некоторых аналоговых микросхем. В **табл. 8** приводится изменение значений напряжения смещения Uсм и коэффициента усиления К операционного усилителя КР140УД708 до и после облучения.

Силовые тиристоры

В схемах защиты сверхпроводящих магнитов УНК при переходе их в нормальное состояние предполагалось использовать силовые тиристоры и диоды [9]. В данной работе испытаниям подвергались мощные транзисторы таблеточной конструкции до 28 класса по напряжению. Тиристоры включались в цепь при разряде конденсаторной батареи. При этом амплитуда импульса тока через тиристор составляла 200 А при напряжении на батарее 200 В. Силовые тиристоры оказались очень чувствительны к воздействию ионизирующего излучения. Приборы более высокого класса по напряжению более чувствительны к излучению, чем тиристоры низких классов. Изменение их параметров и выход из строя наблюдается при значительно меньших дозах. Наиболее заметное влияние радиационные поля оказывают на прямую вольтамперную характеристику тиристора. Следует отметить, что доза, при которой наблюдается двукратное увеличение прямого напряжения на открытом тиристоре, не вызывает заметных изменений других параметров тиристора (параметры цепи управления, обратное напряжение, запирающие свойства), которые могли бы привести к отказу тиристора.

Критерием, по которому можно оценить радиационную стойкость мощных силовых тиристоров, целесообразно считать увеличение прямого напряжения на открытом тиристоре до

уровня, когда мощность потерь в приборе приводит к нагреву полупроводниковой структуры до максимально допустимой температуры с учетом режима эксплуатации и охлаждения тиристора. Результаты испытаний тиристоров типа Т153 1250 11 класса и Т153 1250 28 класса приведены на **рис. 3.**

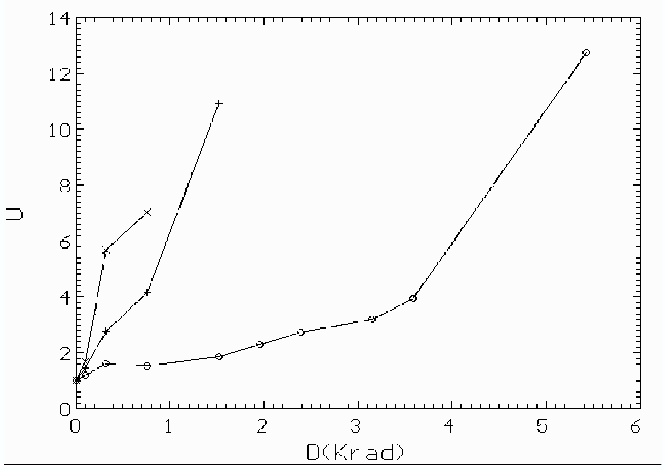

Рис. 3. Изменение прямого напряжения на открытом тиристоре U/B/: x – T153 1250, 28 кл.; o – T153 1250, 11 кл.

6. Облучение электронных модулей

Проведены испытания в рабочем состоянии некоторых модулей системы диагностики пучка и вакуумной системы с текущим контролем дозы по ионизационной камере.

В рабочем состоянии испытывался стабилизированный источник питания корзины электроники для системы диагностики пучка +15В, -15В, +5В, -5В. Изменение выходного напряжения на рабочую нагрузку в относительных единицах от поглощенной дозы представлено на **рис. 4**. По результатам этих испытаний в схемы источника питания внесены коррективы: исключено применение микросхемы КР142ЕН6 на два напряжения, внесено изменение в схему для напряжения U = -5В. Источники работоспособны до 200-300 крад.

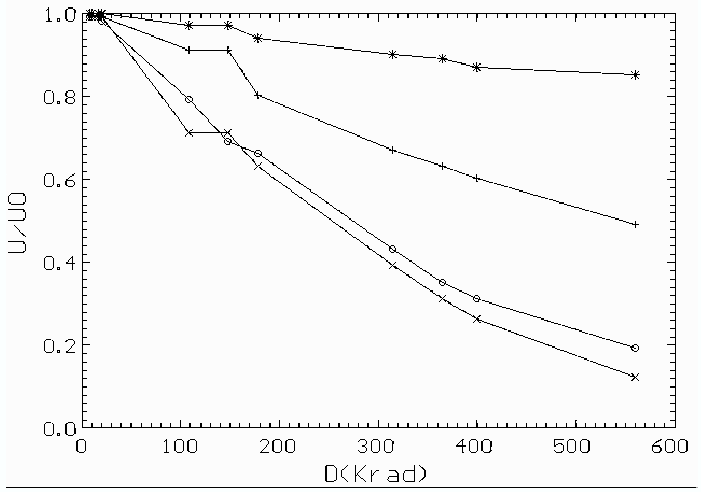

Рис. 4. Зависимость изменения выходного напряжения источника питания корзины электроники от дозы:

* – +5В- КЦ410, КР142ЕН5; o – +15В - КЦ412, КР142ЕН6;
\+ – -5В- КТ814, КТ825, К140УД7; x– -15В.

Проводилось испытание отдельных модулей системы измерения положения пучка. При этом питание и необходимые рабочие сигналы подавались из измерительного домика в зал кольцевого ускорителя.

Испытан преобразователь частоты 200–5 МГц. Результаты измерений и применяемые элементы приведены на **рис. 5.** Данный модуль работоспособен до 500-700 крад.

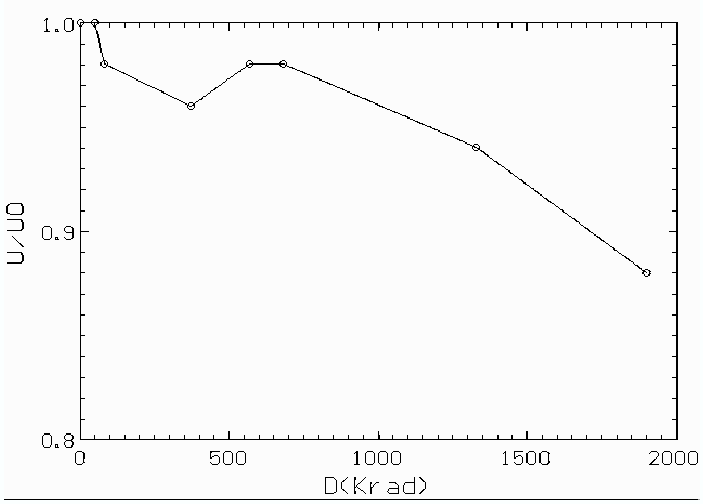

Рис. 5. Зависимость изменения выходного преобразователя частоты 200–5 МГц от дозы. Основные элементы: КР174ПС1, К1500ЛП114, КТС3106, КТ325, КТ521.

Результаты испытания магистрального усилителя и модуля датчика вакуума ДВК приведены также на **рис. 6**. Модули сохранили свою работоспособность при облучении до 400 – 500 крад.

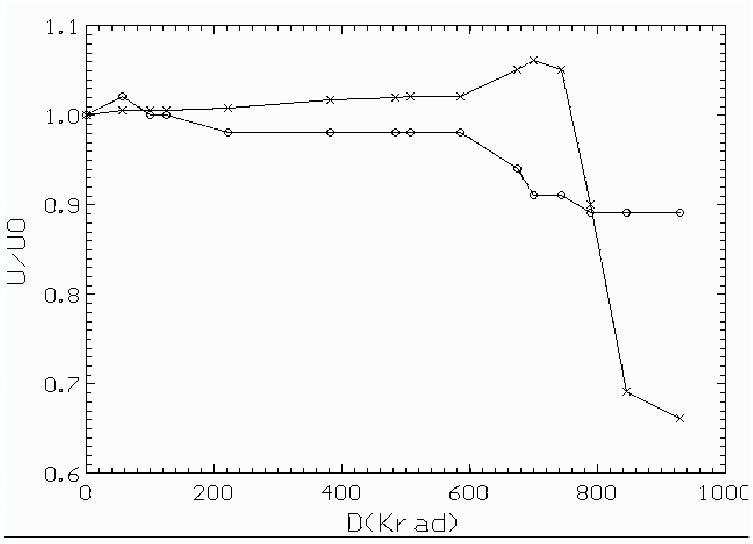

Рис. 6. Зависимость изменения выходного напряжения магистрального усилителя и электронного модуля датчика вакуума ДВК от дозы:

x – усилитель – КР140УД14, КП303, КТ3102, КТ644, КТ646, КД521.

o –ДВК- К157УД2, К561ТМ3, К561ЛА7, К561ЛЕ5, КР140УД6 .

Испытывался также модуль управления корзиной электроники нижнего уровня (АОТ128, К555ЛП8, К1401СА1, К293ЛП1). Наблюдались сбои при дозе 10 крад и потеря работоспособности при 20 крад. Основной причиной отказа явилось использование оптотранзисторов АОТ128. Была проведена корректировка схемы, и в дальнейшем эти элементы использовались только в электронике верхнего уровня.

Кроме того, проводилось испытание электронной приставки ДВЭ (К157УД2, КД522Б и др.) к электроразрядному датчику вакуума ПМН-46 и электронной приставки ДВТ (РГК15, КР142ЕН1Б, КПС104А) к терморезисторному датчику ПМТ-6-3С. После облучения дозами 0,9 и 0,6 Мрад соответственно модули, как показали испытания на вакуумном стенде, оказались неработоспособными.

Выводы

1. Показано, что радиационные поля ускорителей представляют существенную опасность для радиоэлектронной аппаратуры, и при её разработке необходимо уделять внимание выбору элементной базы.
2. Предусмотренные шурфы в туннеле УНК глубиной до 4 м для размещения электронного оборудования позволят существенно снизить ожидаемые уровни облучения аппаратуры.
3. Проведено испытание отдельных элементов и модулей электронной аппаратуры в 27-м промежутке У-70 вблизи мишенной станции.
4. Проведено сравнение воздействия нейтронного излучения реактора и вторичного излучения вблизи мишенной станции У-70 на биполярный транзистор 2Т316Б.
5. Рассмотрена возможность переноса данных по устойчивости отдельных элементов, полученных при облучении на реакторах, на условия ускорителей и показано, что полученные результаты не противоречат теоретическим оценкам [8].

В заключение авторы выражают признательность А.И. Агееву, В.Н. Лебедеву и К.П. Мызникову за постановку задачи и помощь при ее осуществлении.

Литература

[1] Отчет ИФВЭ. Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ, т.10, Радиационные проблемы, радиационная безопасность и радиационный мониторинг (286-VII-03-10-1).
[2] Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. – М.: ЭАИ, 1989.
[3] Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Атомиздат, 1969.
[4] Асеев А.А, Бородин В.Е. – Препринт ИФВЭ 91-64. Протвино, 1991.
[5] Antipov A.V. et al. // Nucl.Instr. and Meth. B94 (1994) 338; Антипов А.В. и др. – Препринт ИФВЭ 77-37, Протвино, 1977.
[6] Бородин В.Е., Гурчин В.Ю. – Препринт ИФВЭ 91-160. Протвино, 1991.
[7] Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. – М.: Наука и техника, 1978.
[8] Alekseev A.G. et al. – IHEP Preprint 94-65. Protvino, 1994.
[9] Курочкин И.А. и др. – В сб.: Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – Дубна, 1989, т.2, с. 326.

Рукопись поступила 25 июня 2002 г.

Приложение

В Приложении приведены результаты испытаний на радиационную стойкость отдельных полупроводниковых элементов и микросхем.

Таблица 3. Данные по воздействию излучения на диоды.

Тип	Прямое напряжение до облучения	Прямое напряжение после облучения	Доза D
КЦ402Е	Uo = 0,75В	Uo = 1,75-3,5В	0,89 Мрад
	U(0,4А) =1В	U(0,4А) = 4-5В	
КД213А		Изменение в пределах 2-3%	0,89 Мрад

Таблица 4. Данные по воздействию излучения на p-i-n диоды.

Тип	Uпр/В/ при I = 25 ма	Uпр/В/ при I = 25ма	Доза D
КА528 № п/п	До облучения	После облучения	
№1	0,78	4,65	1,5
№2	0,75	3,8	1,5
№3	0,75	1,28	0,2
№4	0,77	1,0	0,2
№5	0,76	0,78	0,09
№6	0,76	0,78	0,09

Таблица 5. Изменение коэффициента усиления транзисторов.

Тип	№ п/п	Коэф.усиления β до облучения	Коэф.усиления β после облучения	Доза D
КТ3107	№1	124	12	0,89
	№2	120	8	0,89
КТ 3102	№1	790	15	0,89
	№2	510	15	0,89
	№3	530	15	0,89

Таблица 6. Результаты измерений для цифровых микросхем 1500 и 555 серии.

Тип	Образец	Низкий уровень /В/	Низкий уровень /В/	Высокий уровень /В/	Высокий уровень /В/	Доза D
	№	До облучения	После облучения	До облучения	После облучения	
К1500ЛП107	№1	-0,78	-0,74	-1,59	-1,46В	1,32 Мрад
К1500ЛП107	№2	-0,78	-0,74	-1,6	-1,48	1,32 Мрад
К1500ЛП107	№3	-0.78	-0,74	-1,58	-1,46	1,32 Мрад
К1500ЛП107	№4	-0,78	-0,77	1,61	-1,46	0,66 Мрад
К1500ЛП107	№5	-0,78	-0,77	-1,6	-1,59	0,17 Мрад
К555ЛЕ1	№1	0,13	0,14	3,51	3,42	1,9 Мрад
К555ЛЕ1	№2	0,09	0,14	3,51	3,42	1,9 Мрад
К555ЛЕ1	№3	0,07	0,11	3,52	3,52	1,9 Мрад
К555ЛЕ1	№4	0,14	0,13	3,54	3,54	0,32 Мрад
К555ЛЕ1	№5	0,15	0,15	3,55	3,57	0,24 Мрад

Таблица 7. Результаты измерений для цифровых микросхем 561 серии.

Тип	Образец № п/п	Высокий уровень /В/	Высокий уровень /В/	Доза D
		До облучения	После облучения	
К561ЛП2	№1	9,6	0,62	1,6 Мрад
К561ЛП2	№2	9,62	1,0	1,6 Мрад
К561ЛП2	№3	9,65	0,96	1,6 Мрад
К561ЛП2	№4	9,55	5,48	0,28 Мрад
К561ЛП2	№5	9,5	6,8	0,28 Мрад
К561ЛЕ5	№1	9,4	9,0	0,28 Мрад
К561ЛЕ5	№2	9,55	9,46	0,28 Мрад
К561ЛЕ5	№3	9,49	9,46	0,28 Мрад

Таблица 8. Результаты измерений для операционного усилителя КР140УД708.

Тип	№ п/п	Uсм /мВ/	Uсм /мВ/	K	K	Доза D
		До облучения	После облучения	До облучения	После облучения	
КР140УД708	№1	0,48	22	1363	310	1,5 Мрад
КР140УД708	№2	1:5	25	1110	256	1,5 Мрад
КР140УД708	№3	0,6	1,8	1173	870	0,2 Мрад
КР140УД708	№4	0,26	5,5	1110	870	0,2 Мрад
КР140УД708	№5	0,8	1,0	1560	1360	0,09 Мрад
КР140УД708	№6	0,015	0,4	1110	953	0,09 Мрад

Л.М. Александров и др.
Радиационная стойкость некоторых элементов и электронных узлов оборудования ускорителя.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы WORD.

Редактор Н.В. Ежела. Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 27.06.2002. Формат 60 x 84/8. Офсетная печать. Печ.л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,2. Тираж 130. Заказ 108 . Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.1997.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2002-25, ИФВЭ, 2002