

Федеральное агентство по образованию
**Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)**

А.С. АРТАМОНОВ, А.В. СОГОЯН, А.В. ЯНЕНКО

**Радиационные эффекты
в БИС ОЗУ при воздействии
импульсного ионизирующего
излучения на моделирующей
установке АРСА**

Лабораторная работа

Учебное пособие

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2008

УДК 539.1(076.5)

ББК 22.38я7

А 86

Артамонов А.С., Согоян А.В., Яненко А.В. Радиационные эффекты в БИС ОЗУ при воздействии импульсного ионизирующего излучения на моделирующей установке АРСА: Лабораторная работа. Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 48 с.

Пособие содержит три самостоятельных раздела: «Эффекты в полупроводниковых ИС при воздействии импульсного ионизирующего излучения», «Описание моделирующей установки АРСА», а также «Лабораторная работа», целью которой является изучение радиационных эффектов при воздействии ИИИ на БИС ОЗУ К53РУ6, К132РУ5 и К541РУ1. Лабораторная работа по разделу курса экстремальной электроники создана на базе ускорителя АРСА впервые в мире и предназначена для подготовки специалистов в области микро- и нанoeлектроники. Лабораторная работа рассчитана на студентов старших курсов, может быть полезна при подготовке аспирантов, проводящих исследования в данной области.

Учебное пособие может быть использовано для подготовки специалистов по программе «Ядерная физика и технологии», для студентов высших учебных заведений.

Пособие подготовлено в рамках
Инновационной образовательной программы

Рецензент канд. техн. наук, доцент И.С. Щедрин

ISBN 978-5-7262-0918-0

© Московский инженерно-физический институт (государственный университет), 2008

Содержание

1. Эффекты в полупроводниковых ИС при воздействии импульсного ионизирующего излучения	4
1.1. Основные механизмы взаимодействия ИИ с веществом	4
1.2. Основные единицы измерения излучений	10
1.3. Основные эффекты в полупроводниковых приборах при воздействии импульсного гамма-излучения	12
Контрольные вопросы	20
2. Описание моделирующей установки АРСА	21
2.1. Назначение моделирующей установки АРСА	21
2.2. Состав моделирующей установки АРСА	21
2.2.1. Импульсный ускоритель электронов АРСА	22
2.2.2. Защитный бокс и устройство перемещения	31
2.2.3. Дозиметрическая установка ДТУ-01М	32
3. Лабораторная работа	36
3.1. Цели и задачи лабораторной работы	36
3.2. Объекты исследования	36
3.3. Подключение исследуемых БИС ОЗУ к экспериментальной установке	36
3.4. Методы контроля параметров БИС ОЗУ при проведении исследований	37
3.5. Последовательность проведения исследований (рабочее задание)	42
3.6. Оформление отчета	46
Список основных сокращений	47
Список литературы	47

1. Эффекты в полупроводниковых ИС при воздействии импульсного ионизирующего излучения

1.1. Основные механизмы взаимодействия ИИ с веществом

Прохождение ИИ через вещество сопровождается его взаимодействием с атомами вещества. Результатом взаимодействия является потеря энергии излучения и передача ее среде. Механизмы энерговыделения определяются типом ионизирующих частиц и их энергией. Дальнейшая релаксация полученной энергии и распределение ее по объему вещества происходит в форме радиационных эффектов (рис. 1.1) [1].

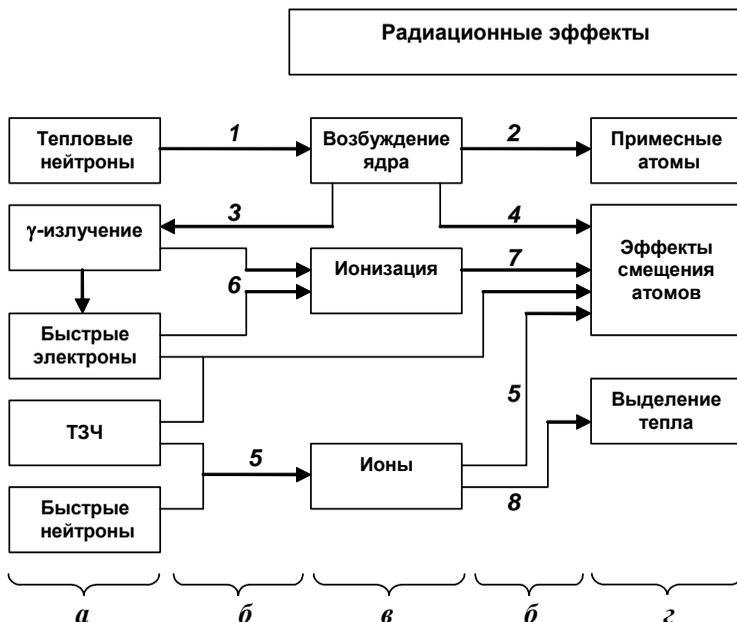


Рис. 1.1. Схема взаимодействия источников ИИ с веществом [1]:
а – источники ИИ; *б* – виды взаимодействия (1 – поглощение, 2 – распад, 3 – вторичное излучение, 4 – отдача, 5 – соударение, 6 – взаимодействие с электронами оболочек, 7 – Оже-каскад, 8 – остановка атома);
в и *г* – кратковременные и долговременные эффекты

Рассмотрим несколько подробнее основные процессы взаимодействия наиболее часто встречающихся видов ИИ с веществом.

Важнейшей количественной характеристикой взаимодействия частицы с атомом является сечение взаимодействия, описывающее изменение того или иного параметра частицы или атома. В радиационных эффектах в полупроводниках и диэлектриках наибольший интерес представляют сечения передачи рассеиваемому атому определенной энергии и захвата налетающей частицы атомным ядром.

В физических процессах, протекающих при взаимодействии частиц ИИ с веществом, все взаимодействия разделяются на упругие и неупругие. Процесс взаимодействия называется упругим, если сумма кинетических энергий взаимодействующих частиц до и после взаимодействия остается неизменной.

При неупругом взаимодействии происходит возбуждение внутренних степеней свободы взаимодействующих частиц. Вследствие этого возможна передача части энергии налетающей частицы электронной или ядерной подсистемам рассеиваемого атома. Характерным примером неупругого взаимодействия излучения с веществом является возбуждение и ионизация электронной оболочки атома. Если приобретаемая электронная энергия достаточно велика, то в атоме может произойти вторичная ионизация вещества.

Неупругое рассеяние частиц на ядерном потенциале атомов происходит в форме ядерных реакций. Во многих случаях процесс ядерной реакции можно разбить на два этапа: захват налетающей частицы с образованием составного ядра и распад составного ядра с образованием конечных продуктов реакции. Сечение ядерной реакции по каждому из механизмов распада определяется типом и энергией налетающей частицы.

Взаимодействие фотонов с веществом также может носить упругий и неупругий характер. В области энергий фотонов от 20 кэВ до 10 МэВ (т.е. для большинства источников ИИ) основными процессами взаимодействия с веществом являются неупругие: фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и образование электронно-позитронных пар. Упругие и неупругие взаимодействия частиц ИИ с веществом приводят к потерям энергии и передаче ее атомной и электронной подсистемам. Особенности проявления

различных механизмов энерговыделения определяются типом ИИ и их энергий.

Если энергетические потери частицы за один акт взаимодействия составляют незначительную часть ее кинетической энергии, то для количественной характеристики потерь энергии частицы ИИ удобно использовать понятие линейной тормозной способности

$$-\frac{dE}{dR} = N \int E d\sigma_{Ei}, \quad (1)$$

где N – концентрация атомов вещества, σ_{Ei} – сечение i -го процесса. Тормозная способность определяет потери энергии частицы на единицу длины траектории и может быть введена для любого i -го взаимодействия, которое не сопровождается резким изменением энергии частицы. Полная тормозная способность определяется суммой тормозных способностей по каждому из механизмов взаимодействия, если между ними отсутствует корреляция.

Квантовое электромагнитное излучение (в рентгеновском и гамма-диапазонах энергий) может взаимодействовать с электронной и ядерной подсистемами атома и приводить к полному поглощению фотона, упругому и неупругому рассеянию. Основными процессами при энергии квантов до нескольких МэВ являются процессы передачи энергии электронной подсистеме – фотоэффект и неупругое (комптоновское) рассеяние. Сечение непосредственного взаимодействия фотонов с ядрами атомов вещества в этом диапазоне энергий мало. Передача энергии атомам вещества происходит косвенно посредством электронов отдачи. При более высоких энергиях возрастает роль процессов с участием кулоновского поля ядра (образование электронно-позитронных пар) и поля ядерных сил (фотоядерные реакции).

При фотоэффекте фотон поглощается и передает свою энергию одному из электронов. При этом фотоэлектрон приобретает кинетическую энергию, равную энергии поглощенного фотона за вычетом энергии связи электрона на данной оболочке. После выбивания связанного электрона появившийся свободный уровень заполняется электроном, и фотоэффект завершается испусканием вторичного низкоэнергетического характеристического фотонного излучения – флуоресценцией.

Поперечное сечение фотоэффекта испытывает скачки при энергии фотонов, равной энергии связи электронов в атоме. При энергии фотонов выше энергии связи электронов K -оболочки атома E_K , но ниже релятивистской ($E_K < E \ll m_e c^2$) сечение фотоэффекта имеет вид

$$\sigma_{ph,K} \approx \frac{32 \sqrt{2} \pi r_e^2 (m_e c^2)^{7/2}}{3 \cdot 137^4 E^{7/2}} Z^5, \quad (2)$$

где $r_e = q_e^2 / m_e c^2 = 2,82 \cdot 10^{-13}$ см – классический радиус электрона; $\sigma_{ph,K}$ – сечение фотоэффекта на K -оболочке.

Как видно из (2), сечение фотоэффекта быстро убывает с ростом энергии фотонов. Поэтому фотоэффект играет существенную роль лишь для рентгеновских квантов, особенно в веществах с большим зарядом атомов Z .

В случае комптоновского рассеяния фотон в результате взаимодействия с электроном передает ему часть энергии и изменяет направление своего движения. Комптоновское рассеяние сравнительно слабо зависит от заряда атомов вещества и преобладает над другими процессами взаимодействия фотонов в довольно широком диапазоне: от 0,5 до 5 МэВ в свинце и от 0,05 до 15 МэВ в алюминии.

Третьим основным процессом взаимодействия фотонного излучения с веществом является эффект образования электронно-позитронных пар в поле ядра атома или электрона. Образующейся паре передается практически вся энергия падающего фотона (доля энергии, передаваемой при этом ядру, сравнительно мала – обычно меньше 5 кэВ).

Кинетическая энергия пары, образовавшейся в поле ядра, равна энергии фотона минус энергия покоя образованной пары ($2m_e c^2 = 1,022$ МэВ), т.е. процесс имеет порог. Сечение образования пар монотонно возрастает от нуля (при пороговой энергии) до квазипостоянного значения (в области энергий 50 МэВ) в материалах с высоким Z , а при ее больших энергиях – в материалах с низким Z . Энергия фотона распределяется поровну между электроном и позитроном. Образовавшийся свободный позитрон нестабилен в

присутствии электронов среды и быстро рекомбинирует с одним из них. Аннигиляция позитрона приводит к возникновению двух гамма-квантов с энергией 0,511 МэВ.

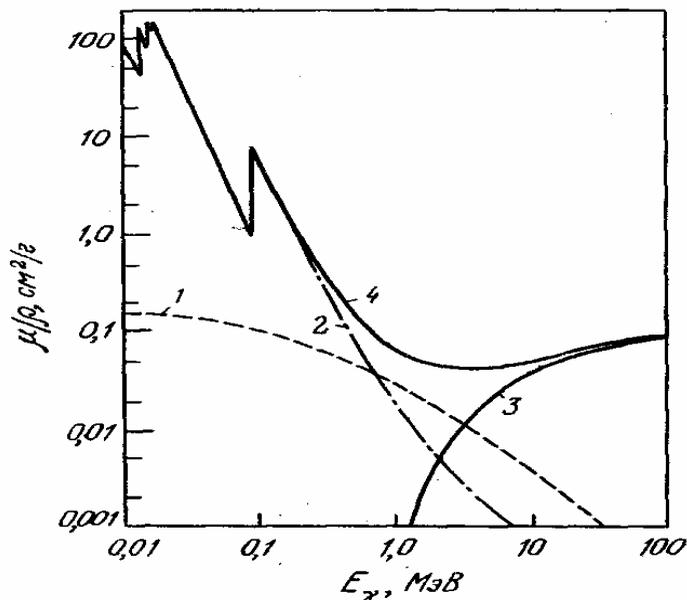


Рис. 1.2. Массовый коэффициент поглощения фотонов в свинце:
 1 – комpton-эффект; 2 – фотоэффект; 3 – рождение пар;
 4 – суммарное поглощение

Фотоядерные реакции возможны при поглощении ядром атома гамма-кванта с энергией $10 \div 20$ МэВ и приводят к излучению протона или нейтрона. Различный характер зависимости сечений фотоэффекта комптоновского рассеяния и эффекта образования пар от энергии квантов и атомного заряда вещества позволяет выделить области энергии, где преобладает каждый из указанных эффектов.

В результате взаимодействия с веществом интенсивность потока фотонного излучения при прохождении слоя толщиной x убывает по закону:

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad \mu = N\sigma, \quad (3)$$

где μ – линейный коэффициент поглощения излучения (коэффициент передачи энергии электронам вещества), пропорциональный суммарному сечению взаимодействия излучения с веществом σ , N – плотность атомов вещества.

В справочниках приводятся значения полного линейного коэффициента поглощения энергии квантов и массового коэффициента поглощения энергии фотонов $(\mu/\rho)_e$, нормированные на плотность вещества. Из рис. 1.2 видно, что для большинства материалов электронной техники ($Z = 10 \div 30$) преобладающим является фотоэффект – при низких энергиях квантов и комптоновский эффект – при высоких.

Энергия, переданная электронам при первичных актах взаимодействия фотонов, перераспределяется в дальнейшем между атомной и электронной подсистемами вещества. Энергия фотоэлектронов, как правило, невелика, поэтому заметной передачи энергии атомам вещества не происходит. Можно считать, что вся энергия уходит на ионизацию и возбуждение электронной подсистемы.

Более энергичные комптоновские электроны способны передавать атомам вещества энергию, сравнимую с энергией их связи в кристаллической решетке.

Реакция ПП приборов при воздействии ИИ чаще всего обусловлена следующими основными типами процессов: ионизация атомов вещества; образование структурных повреждений; излучение электромагнитных волн (тормозное, черенковское и др.); протекание ядерных реакций. При воздействии ИИ в веществе могут происходить все указанные процессы, однако для гамма-излучения с энергией квантов $10 \div 1000$ кэВ наиболее существенным является процесс ионизации.

Сущность эффекта ионизации заключается во взаимодействии излучения с электронами атомных оболочек, в результате которого электронам передается энергия, достаточная для перехода их в зону проводимости и формирования свободных электронно-дырочных пар. Количество таких пар ΔN , образуемых в однородном материале, пропорционально энергии ΔE_i , которая передана излучением на ионизацию.

Средняя энергия образования одной электронно-дырочной пары (ионизации) определяется как $E_I = \Delta E_i / \Delta N$ и зависит от ширины запрещенной зоны материала. Для полупроводников эта зависимость описывается эмпирическим соотношением $E_I \approx 2,67E_g + 0,86 \text{ эВ}$, откуда $E_I(\text{Si}) \sim 3,6 \text{ эВ}$; $E_I(\text{Ge}) \sim 2,8 \text{ эВ}$. Средняя энергия E_I заметно больше ширины запрещенной зоны, что связано с передачей части энергии при ионизации фононам.

Таким образом, воздействие рентгеновского и гамма-излучения на полупроводники и диэлектрики приводит к ионизации вещества. Образующиеся свободные электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне обуславливают протекание ионизационных токов и накопление заряда на ловушках. Эти процессы определяют ионизационную реакцию ПП приборов.

1.2. Основные единицы измерения излучений

При определении уровней параметров и характеристик ИИ используют единицы измерений, приведенные ниже.

Активность источника излучения – число распадов в единицу времени. Измеряется в Беккерелях (Бк): 1 Бк = 1 распад/с. Внесистемной единицей измерения активности является кюри (Ки): 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк, 1 Бк = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки.

Частицы высоких энергий принято характеризовать потоком и плотностью потока.

Флюенс частиц Φ – число частиц, прошедших через единицу площади; измеряется в единицах частиц/см².

Энергетический спектр – распределение потока частиц по энергии.

Керма K – энергия, переданная излучением единице массы однородного вещества. Измеряется в Дж/кг. В общем случае существует ряд параллельно протекающих процессов распределения энергии, переданной излучением веществу. Каждому процессу соответствует своя керма. Так, процесс ионизации описывается i -кермой

$$K_i = k_n \Phi \left(\frac{dE}{dx} \right)_{ion} \frac{1}{\rho}, \quad (4)$$

где Φ – флюенс частиц, $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion}$ – линейные ионизационные поте-

ри ИИ в веществе, ρ – плотность вещества, k_{π} – коэффициент пропорциональности (например, если ЛПЭ выражены в МэВ/см, а ρ – г/см³, то $k_{\pi} = 1,6 \cdot 10^{-8}$ рад·г·МэВ⁻¹).

Понятие кермы удобно для описания процессов однородного поглощения в веществах. Часть энергии, выделившейся в первичном акте взаимодействия, уносится вторичными частицами (чаще всего – электронами). В однородных материалах существует динамическое равновесие между энергией, вносимой и уносимой вторичными частицами из элементарного объема. В неоднородных материалах это равновесие нарушается, в результате чего энергия, фактически поглощаемая в единице объема материала, отличается от кермы.

Поглощенная доза D – количество энергии $dE_{\text{погл}}$, поглощенной в единице объема dV вещества с плотностью ρ :

$$D = \frac{dE_{\text{погл}}}{dV} \frac{1}{\rho}. \quad (5)$$

Единицей измерения является Грей (Гр): Гр = Дж/кг. Внесистемной единицей измерения поглощенной дозы является рад: 1 Гр = 100 рад. Как и керма, поглощенная доза зависит от вида вещества, которое обычно указывается вместе с числовым значением поглощенной дозы, например, 200 рад [Si].

Мощность поглощенной дозы (мощность дозы) P – энергия, поглощаемая в единицу времени в единице объема вещества плотностью ρ .

Экспозиционная доза D_I – определяется как заряд dQ , выделившийся в единице объема dV вещества с плотностью ρ_A :

$$D_I = \frac{dQ}{dV} \frac{1}{\rho_A}. \quad (6)$$

Обычно экспозиционная доза измеряется в рентгенах (Р), где 1 Р – экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой суммарный заряд ионов одного знака, образовавшихся в результате облучения, равен $1/3 \cdot 10^{-8}$ Кл в 1 см⁻³ воздуха при нор-

мальных условиях ($1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$). Экспозиционная доза используется для характеристики радиационной обстановки вне объекта. Поглощенная в материале доза связана с экспозиционной дозой ИИ. Количественные характеристики этой связи зависят от параметров излучения (тип частиц, энергия и др.) и материала.

Эквивалентная доза – мера воздействия ИИ на человеческий организм. Определяется как $D_3 = kD$, где D – поглощенная доза, k – коэффициент биологического воздействия (коэффициент качества). Единицей эквивалентной дозы является бэр (биологический эквивалент рентгена): $1 \text{ бэр} = k \cdot 1 \text{ рад}$. В системе СИ вводится единица зиверт (Зв): $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$. Эмпирический коэффициент k составляет ~ 1 для гамма-квантов и электронов, 10 для α -частиц, протонов и дейтронов, 20 для ТЗЧ и $2 \div 10$ для нейтронов.

1.3. Основные эффекты в полупроводниковых приборах при воздействии импульсного гамма-излучения

Воздействие импульсного ИИ на ПП ИС приводит к возникновению переходных эффектов (сбоев) и остаточных отказов (обратимых или необратимых). Переходные эффекты – кратковременные изменения параметров или нарушения функционирования в процессе и после воздействия импульса ИИ, связанные с генерацией электронно-дырочных пар и дальнейшей релаксацией свободного заряда в элементах ИС [2]. При этом по внешним выводам элементов протекают ионизационные токи, способные вызвать ложные переключения в ИС. В комбинационных ИС (логических элементах, мультиплексорах, сумматорах и др.) через некоторое время после импульса ИИ происходит полное восстановление первоначального состояния, определяемого комбинацией входных сигналов. В последовательностных ИС (регистрах, ЗУ, микропроцессорах) могут наблюдаться изменение внутренних состояний и потеря информации, которая восстанавливается только перезаписью.

Значительные токи, протекающие в объеме и по выводам ИС при воздействии импульсного ИИ, вызывают остаточные отказы вследствие вторичных эффектов радиационного защелкивания и теплового пробоя, которые могут быть обратимыми (работоспособность ИС можно восстановить, например, отключением пита-

ния) или необратимыми (катастрофическими, например, вследствие перегорания шин металлизации).

Наиболее используемыми показателями радиационной стойкости КМОП ИС при воздействии импульсного ИИ являются:

- уровень бесбойной работы (УБР) – максимальный уровень воздействия, при котором не наблюдаются параметрические и функциональные отказы согласно ТУ;
- предельный уровень – максимальный уровень воздействия, при котором не происходят необратимые отказы;
- время потери работоспособности (ВПР) – интервал времени от момента потери работоспособности ИС при воздействии импульсного ИИ до полного ее восстановления согласно ТУ.

Уровень воздействия характеризуется мощностью поглощенной дозы P , рад/с, или поглощенной дозой D , рад, при определенной длительности импульса ИИ.

Реакция микросхем определяется, в основном, процессами, протекающими в простейших элементах ИС: объемных областях полупроводника и p - n переходах. Так, в однородных областях наблюдаются модуляция проводимости, возникновение нестационарных электрических полей и т.д. В неоднородных структурах (p - n переходах, биполярных транзисторах) основным эффектом является протекание ионизационных токов. Кроме того, вследствие взаимовлияния областей происходит отпирание p - n переходов, активизация паразитных структур (защелкивание) и т.д.

Наиболее значимым эффектом при воздействии импульсного ИИ на диодные структуры КМОП ИС является образование ионизационного тока вследствие дрейфа избыточных носителей из ОПЗ переходов (мгновенная составляющая ионизационного тока), а также диффузии и дрейфа неосновных носителей из квазинейтральных областей (запаздывающая составляющая). Таким образом, в процессе воздействия ИИ p - n переход выступает в качестве источника ионизационного тока.

На рис. 1.3 показаны типовые зависимости амплитудных зависимостей плотности ионизационного тока перехода от мощности дозы P . В общем случае, каждая кривая имеет три характерных участка: при малых P – линейный, при повышении P – гиперлинейный и при предельных значениях – сублинейный.

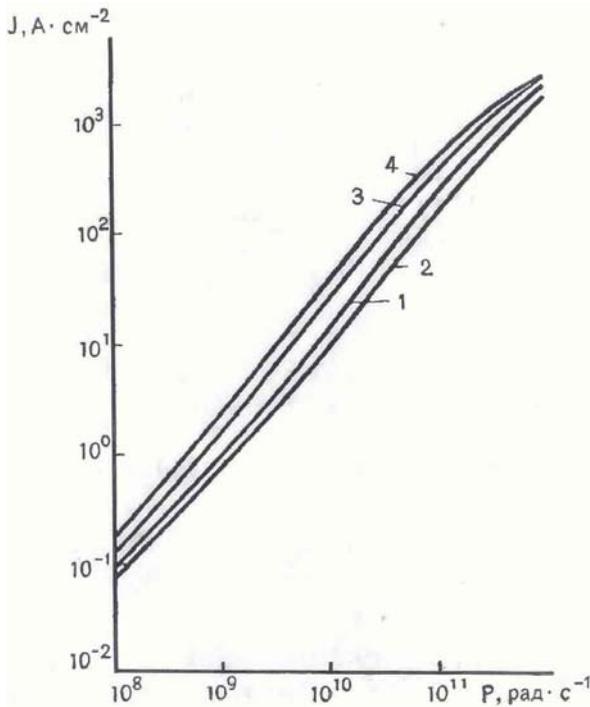


Рис. 1.3. Характерные кривые амплитудных зависимостей плотности ионизационного тока перехода от мощности дозы ИИ при $N = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и различных длительностях импульса: 1 \div 10 нс; 2 \div 20 нс; 3 \div 50 нс; 4 \div 100 нс

Следуя [2], рассмотрим импульсную реакцию базовых структур ИС.

Резистивные элементы формируются однородными областями подложки и кармана, ограниченными контактами или $p-n$ переходами. Доминирующим механизмом ИР данных областей является модуляция проводимости. На ЭЭС такие области представляются резисторами, которые моделируют разность потенциалов между узлами при протекании через ветвь тока заданной величины. В линейной области мощности дозы ИИ сопротивления постоянны и определяются удельным сопротивлением материала (кармана или подложки), а также формой и размерами областей и контактов с

учетом неоднородных эффектов. В нелинейном диапазоне мощности сопротивление складывается из приконтактных и объемных составляющих, соотношение которых определяется степенью ионизации, топологией структуры и граничными условиями.

Диодные элементы формируются $p-n$ переходами областей стоков и истоков МОП транзисторов, эмиттеров охранных диодов с подложкой или карманом, а также областей карманов и охранных колец с подложкой. ИР диодных элементов определяется эффектами разделения и собирания свободных носителей, а также отпираания и "заливания" $p-n$ переходов при высокой степени ионизации. На рис. 1.4 представлена ЭЭС диодного элемента. Диод VD моделирует ВАХ и инерционные свойства $p-n$ перехода, генератор тока $I_n(T)$ задает ионизационный ток, а резисторы $R_э$, $R_б$ определяют падение напряжений на областях эмиттера и базы. В линейной области мощности дозы элемент VD соответствует традиционной модели диода без учета импульсного ИИ. Однако при предельных уровнях ИИ происходит "заливание" $p-n$ переходов, ЭЭС диодного и резистивного элементов становятся эквивалентными.

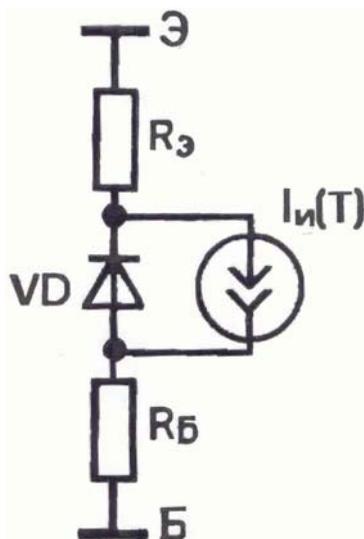


Рис. 1.4. Упрощенная ЭЭС диодного элемента

Биполярные транзисторные элементы (БТЭ) имеются как в биполярных ИС (активные элементы), так и в КМОП ИС (паразитные структуры). В отсутствие воздействия импульсного ИИ БТЭ в КМОП ИС заперты и не оказывают влияния на работу КМОП ИС. Доминирующими механизмами ИР биполярных транзисторных структур являются их активизация, усиление ионизационных токов, а также вторичный тепловой пробой. Реакция БТЭ при воздействии импульсного ИИ описывается упрощенной ЭЭС, представленной на рис. 1.5. Здесь VT моделирует ВАХ, активные и инерционные свойства транзисторной структуры, генераторы тока $I_{иЭ}$, $I_{иК}$ – ионизационные токи эмиттерного и коллекторного переходов, R задает потенциал базы на границе с эмиттерным переходом при протекании ионизационных токов. В отсутствие воздействия ИИ, а также при малой мощности дозы паразитные транзисторы в КМОП ИС заперты. При малых значениях коэффициента усиления тока базы β (что реализуется в паразитных структурах), когда усиленными (транзисторными) свойствами рассматриваемых структур можно пренебречь, их ЭЭС сводится к суперпозиции ЭЭС диодных элементов, соответствующих эмиттерному и коллекторному $p-n$ переходам.

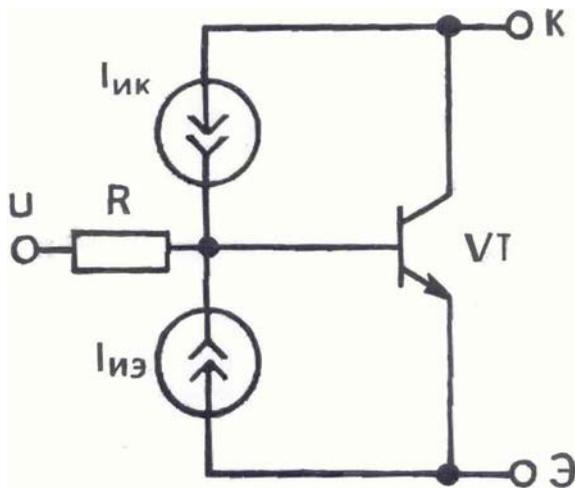


Рис. 1.5. Упрощенная ЭЭС БТЭ

Протекание ионизационных токов при повышении мощности дозы приводит к отпираанию эмиттерного перехода БТЭ из-за падения напряжения в подложке (кармане), и транзистор переходит в активную область. В БТЭ с $\beta > 1$ происходит усиление первичного (образование вторичного) ионизационного тока. В линейной области мощности дозы ИИ модель VT соответствует традиционной модели биполярного транзистора в импульсном режиме без учета ИИ. В нелинейном диапазоне мощности дозы построение ЭЭС и идентификация ее параметров производятся на основе численного моделирования или лабораторных исследований тестовых структур.

Транзисторные МОП элементы. Основными функциональными элементами КМОП ИС являются МОП-транзисторы. При анализе ИР необходимо рассматривать МОП-транзисторные элементы (МОПТЭ), которые представляют суперпозицию МОП-транзистора и паразитного БТЭ исток (эмиттер) – подложка (база) – сток (коллектор). Основными механизмами ИР МОПТЭ являются:

- ионизационные токи стоковых и истоковых $p-n$ переходов;
- активизация паразитного БТЭ и образование вторичного ионизационного тока;
- изменение (деградация) характеристик МОП-транзистора.

Данные эффекты в n -канальном МОП-транзисторе описываются ЭЭС (рис. 1.6). Здесь МТ моделирует ВАХ и инерционные свойства МОП-транзистора с учетом их изменения при воздействии импульсного ИИ, VT – паразитная биполярная транзисторная структура, генераторы $I_{ин}$, $I_{ис}$ – источники ионизационных токов истокового и стокового $p-n$ переходов, R – сопротивление подложки между контактом к ней и стоковым $n-p$ переходом.

Собственно МОП-транзистор практически не оказывает влияния на ИР МОПТЭ. В частности, экспериментально установлено, что ионизационный ток стока тестовых МОПТЭ до предельных мощностей доз ИИ практически не зависит от потенциала затвора и режима работы транзистора (отперт или заперт). Таким образом, в большинстве случаев ЭЭС МОПТЭ определяется суперпозицией модели МОП-транзистора без учета импульсного ИИ и БТЭ.

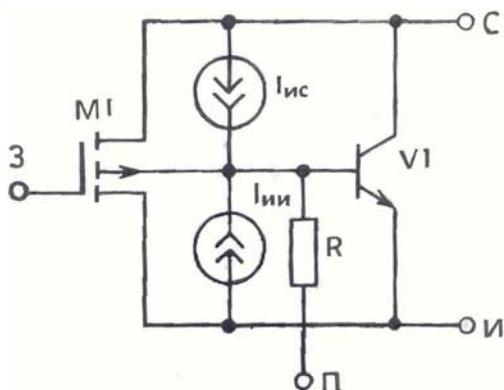


Рис. 1.6. Упрощенная ЭЭС МОП-транзистора

Тиристорные элементы. Формирование МОП-транзисторов в КМОП ИС с изоляцией p - n переходом сопровождается формированием различных паразитных четырехслойных структур тиристорных элементов (ТЭ) (рис. 1.7). При отсутствии ИИ данные структуры заперты и не оказывают влияния на функционирование КМОП ИС. При воздействии импульсного ИИ в ТЭ проявляются следующие основные эффекты:

- образование ионизационного тока перехода карман-подложка;
- отпирание катодного и анодного p - n переходов;
- регенеративное усиление ионизационного тока в петле положительной обратной связи и переход структуры в низкоимпедансное состояние.

Общим свойством радиационного поведения объемных КМОП ИС с изоляцией p - n переходами при различных дестабилизирующих воздействиях – импульсном ионизирующем излучении, воздействии отдельных ядерных частиц, резком изменении питающего напряжения (в том числе при включении), повышенной температуре и т.п. – является их подверженность эффекту защелкивания. Эффект защелкивания – это пороговый регенеративный эффект, связанный с активизацией паразитных многослойных (четырёх и более взаимодействующих областей) структур при дестабилизирующих воздействиях.

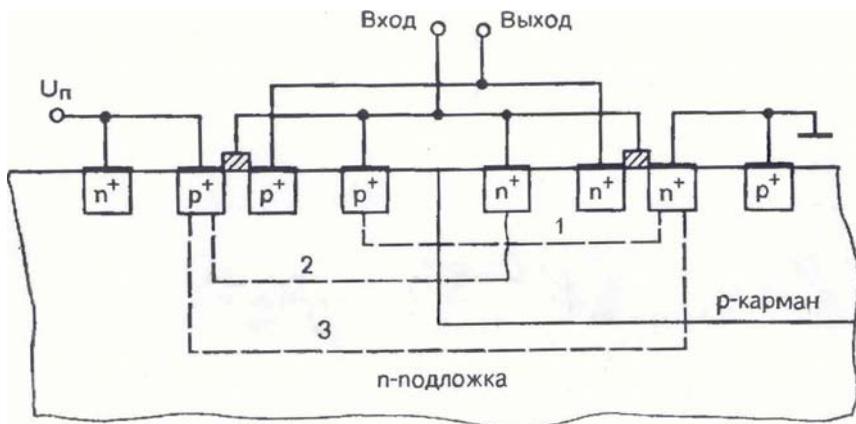


Рис. 1.7. Четырехслойные $p-n-p-n$ паразитные структуры КМОП ИС:
1 – входной защитный диод в подложке - подложка - карман - исток n -канального МОП-транзистора; **2** – исток p -канального МОПТ - подложка - карман - входной защитный диод в кармане; **3** – исток p -канального МОПТ - подложка - карман - МОП-исток n -канального МОП-транзистора

Характерной особенностью многослойных структур является немонотонный характер ВАХ, приводящий в конечном счете к наличию нескольких (двух и более) устойчивых состояний, из которых лишь одно является рабочим для КМОП ИС. В частности, для четырехслойных структур характерны два возможных устойчивых и одно неустойчивое состояние.

Эффект защелкивания проявляется в виде полной или частичной потери работоспособности КМОП ИС и сопровождается значительным увеличением тока потребления по питанию, входных или выходных токов по выводам ИС. При этом работоспособность ИС после окончания дестабилизирующего воздействия не восстанавливается, т.е. эффект имеет остаточный характер (рис. 1.8). Восстановления работоспособности ИС можно добиться путем кратковременного отключения напряжения питания.

Таким образом, воздействие ИИ на ИС приводит к возникновению переходных (временных) и остаточных эффектов. Остаточные эффекты могут иметь обратимый и необратимый характер.

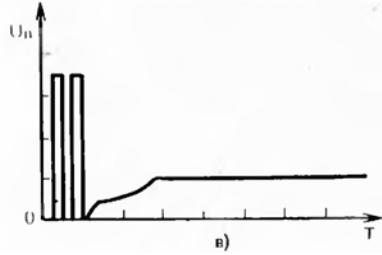
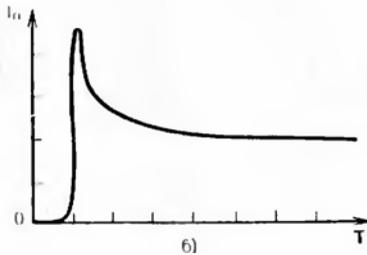
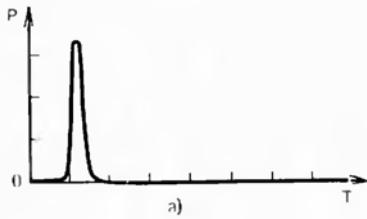


Рис. 1.8. Характерные временные зависимости параметров КМОП ИС при защелкивании: импульс ИИ (а), ток потребления (б), выходное напряжение (в)

Контрольные вопросы

1. В чем основное различие упругих и неупругих процессов взаимодействия частиц ИИ с веществом?
2. Какие процессы являются доминирующими при взаимодействии гамма-излучения в области энергий фотонов от 20 кэВ до 10 МэВ с веществом?
3. Что такое линейная тормозная способность частицы?
4. Оцените отношение сечений фотоионизации K -оболочек кремния ($Z = 14$) и германия ($Z = 32$) для энергии фотонов 40 кэВ.
5. Почему средняя энергия образования электрон-дырочной пары в ПП превышает ширину запрещенной зоны?
6. В чем отличие кермы от поглощенной дозы ИИ?
7. Что такое уровень бессбойной работы электронного устройства при воздействии импульсного ионизирующего излучения?

2. Описание моделирующей установки АРСА

2.1. Назначение моделирующей установки АРСА

Моделирующая установка АРСА предназначена для проведения исследований воздействия тормозного излучения на элементы и материалы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

2.2. Состав моделирующей установки АРСА

В состав моделирующей установки АРСА входят:

- импульсный ускоритель электронов АРСА;
- защитный бокс с устройством перемещения;
- аппаратно-программный комплекс АПИК для функционального контроля и контроля статических параметров во время воздействия;
- дозиметрическая установка ДТУ-01 с термолюминисцентными детекторами ПСТ.

На рис. 2.1 представлен вид внутри защитного блока моделирующей установки АРСА.



Рис. 2.1. Вид внутри защитного блока моделирующей установки АРСА

2.2.1. Импульсный ускоритель электронов АРСА

Импульсный ускоритель АРСА (разработка и производство ИЯРФ-ВНИИЭФ, г. Саров), являющийся переносным источником рентгеновского или электронного излучения, не содержит радиоактивных веществ и представляет собой экологически безопасное устройство. Импульсное ионизирующее излучение (длительностью $\sim 10^{-8}$ с) возникает по команде оператора с пульта управления ускорителя или специальным сигналом от внешнего устройства только после подключения установки к электрической сети. При проведении работ на ускорителе и после их окончания в облучаемых объектах и деталях установки наведенная радиоактивность полностью отсутствует. При правильной эксплуатации уровень электромагнитных полей, создаваемых ускорителем АРСА, не мешает работе компьютеров и другой РЭА, находящихся в непосредственной близости. Все имеющиеся в ускорителе АРСА высоковольтные цепи защищены металлическими кожухами или находятся в герметичных корпусах. Ускоритель оборудован защитной системой блокировки.

Импульсный ускоритель АРСА может представлять опасность как источник высокого напряжения и синхронного с ним рентгеновского или электронного излучения. Источниками высокого напряжения являются импульсный трансформатор и высоковольтные элементы электрической схемы, расположенные в высоковольтном блоке и зарядном устройстве.

Источником ионизирующего излучения является ускорительная трубка, работающая в импульсном режиме. Для генерации электронного излучения используется электронная ускорительная трубка. Для получения рентгеновского излучения необходима замена трубки на рентгеновскую с поглощающим электроны фильтром на выходном окне. Ускорительная трубка расположена в высоковольтном блоке. Для уменьшения рассеянного (бокового) рентгеновского излучения трубка находится в свинцовом защитном кожухе. Количество импульсов за рабочий день ограничивается предельно допустимой дозой на рабочем месте.

Степень защиты ускорителя АРСА соответствует исполнению IP20 по ГОСТ 14254-80. По степени защиты от поражения электрическим током ускоритель АРСА относится к I классу по ГОСТ 12.2.007.0-75.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРИТЕЛЯ АРСА

- Максимальная энергия квантов, МэВ..... не менее 0,9
- Диаметр пятна излучения на 1 см
от выходного окна трубки, мм..... не менее 10
- Мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения
на 1 см от выходного окна трубки при стабильности
по дозе не хуже $\pm 20\%$, Р/сне менее $1 \cdot 10^{10}$
- Мощность поглощенной дозы электронного излучения
на 1 см от выходного окна трубки, рад/сне менее $1 \cdot 10^{14}$
- Длительность импульса рентгеновского излучения
на полувысоте при стабильности по длительности
не хуже 20% , нс не менее 7
- Режим подачи импульсов – однократный. Минимальное
время между импульсами, с 2
- Параметры синхроимпульса,
вырабатываемого ускорителем АРСА:
амплитуда, В 4 ± 1
длительность переднего фронта, нс около 2
длительность по основанию, нс около 7
время опережения синхроимпульса по отношению
к импульсу излучения с доверительной
вероятностью 0,95, нс $25,4 \pm 0,2$
- Внешний пуск ускорителя может быть осуществлен от внеш-
него генератора через разъем «ПУСК» типа СР50, распо-
ложенный на боковой поверхности зарядного устройства.
Параметры пускового сигнала:
амплитуда при согласованной нагрузке 50 Ом, В..... $5 \pm 0,5$
длительность, мкс не менее 4
передний фронт, нс не более 40
частота следования, Гц не более 1
- Задержка пуска высоковольтного блока относительно
фронта пускового сигнала при доверительной
вероятности 0,95, мкс $12,3 \pm 0,1$
- Ресурс ускорителя (расчетный), импульсы..... не менее 10^6
- Питание импульсного ускорителя АРСА осуществляется
от сети переменного тока:
напряжение, В..... $220 + 10$
частота, Гц $50 + 0,5$

- Мощность, потребляемая при нормальном значении питания, Вт.....не более 500
- Габаритные размеры:
 высоковольтный блок:
 диаметр, мм..... 225
 высота, мм..... 850
 зарядное устройство, мм³..... 500 × 300 × 120
 пульт управления, мм³..... 83 × 54 × 30
- Масса:
 высоковольтный блок, кг..... 55
 зарядное устройство, кг..... 13
 пульт управления, кг..... 0,1

СОСТАВ ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ АРСА

Импульсный ускоритель АРСА выполнен в виде переносной конструкции, состоящей из трех отдельных блоков: высоковольтного блока с ускорительной трубкой, зарядного устройства, пульта управления и комплекта соединительных кабелей (см. рис. 2.1). Блок-схема ускорителя приведена на рис. 2.2. В рентгеновском режиме работы ускорителя на выходное окно трубки помещается алюминиевый фильтр, предназначенный для поглощения электронов.

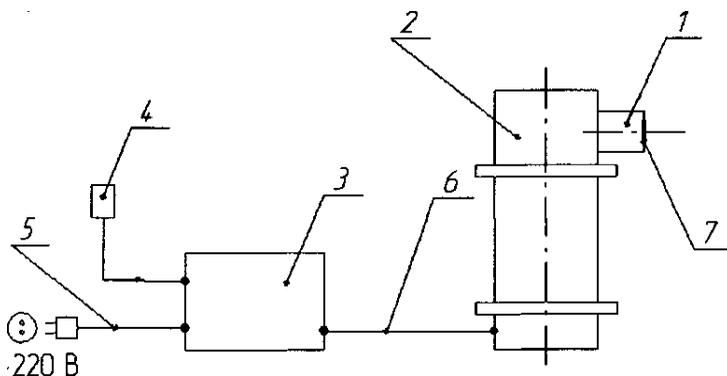


Рис. 2.2. Блок-схема соединения составных частей ускорителя АРСА:
 1 – ускорительная трубка; 2 – высоковольтный блок; 3 – зарядное устройство;
 4 – пульт управления с кабелем управления (длина 8 м);
 5 – сетевой шнур (длина 1,5 м); 6 – высоковольтный кабель (длина 5 м);
 7 – фильтр поглощения электронов (для рентгеновских трубок)

УСТРОЙСТВО И РАБОТА

Импульсный ускоритель АРСА является ускорителем прямого действия, генератор импульсного напряжения (ГИН) которого выполнен по схеме Аркадьева-Маркса на неуправляемых газонаполненных разрядниках с импульсной зарядкой накопительных конденсаторов от высоковольтного импульсного трансформатора. Ионизирующее излучение наносекундной длительности генерируется в вакуумной отпаянной трубке с холодным катодом и анодом проточного типа.

Управление ускорителя осуществляется с помощью выносного пульта управления, соединенного с зарядным устройством кабелем управления.

Рабочие положения высоковольтного блока ускорителя АРСА приведены на рис. 2.1.

Высоковольтный блок выполнен в виде герметичного стального корпуса цилиндрической формы, снаружи которого имеются две поперечные ручки для транспортировки. На заднем фланце корпуса расположен резиновый маслорасширитель с предохранительным кожухом. В нижней части корпуса расположены высоковольтный разъем для подключения зарядного устройства и разъем синхронного запуска внешней аппаратуры по сигналу, вырабатываемому ускорителем.

В высоковольтном блоке размещены: ГИН, собранный на конденсаторах К15-10, высоковольтный импульсный трансформатор, узел быстрой замены трубки и отпаянная ускорительная трубка. Внутренний объем высоковольтного блока залит трансформаторным маслом селективной очистки (ГОСТ 10121-76) с пробивным напряжением не менее 65 кВ на стандартном 2,5 мм зазоре.

Высоковольтные емкости $C1 \div C10$ ГИН (рис. 2.3) заряжаются от высоковольтного импульсного трансформатора T через цепочку индуктивностей $L1 \div L20$ до напряжения пробоя разрядника $F1$. После пробоя разрядника $F1$ возникшее перенапряжение вызывает срабатывание остальных разрядников $F1 \div F10$. В результате емкости $C1 \div C10$ оказываются соединенными последовательно, и на катоде трубки $V1$ формируется импульс высокого напряжения, вызывающий появление электронного излучения.

Синхроимпульс для запуска внешней аппаратуры формируются после пробоя разрядника **F1** на емкостном делителе напряжения **C11**, **C12** (емкость **C11** является конструкционной). Для дальнейшего понижения амплитуды синхроимпульса предназначен омический делитель напряжения **R1**, **R2**.

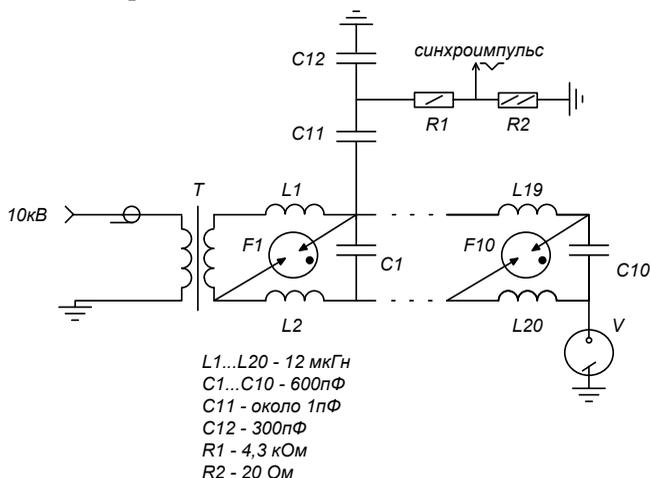


Рис. 2.3. Схема электрическая принципиальная высоковольтного блока импульсного ускорителя АРСА

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО

Зарядное устройство обеспечивает зарядку первичной накопительной емкости 2 мкФ до напряжения 10 кВ и последующую коммутацию через высоковольтный малоиндуктивный кабель на первичную обмотку высоковольтного импульсного трансформатора, находящегося в высоковольтном блоке. Зарядное устройство собрано в металлическом корпусе прямоугольной формы. В нем размещаются:

- накопительные конденсаторы;
- высоковольтный трансформатор с множителем напряжения для зарядки накопительных конденсаторов;
- коммутирующий разрядник;
- высоковольтный трансформатор поджига разрядника;
- блок электроники.

Блок электроники размещен в экранирующем корпусе и содержит плату управления и стабилизации напряжения на накопительных конденсаторах, а также плату силового преобразователя, работающего на высоковольтный трансформатор с умножителем.

На боковой панели блока расположены:

- сетевой разъем, конструктивно объединенный с сетевым предохранителем и выключателем сетевого питания «СЕТЬ»;
- светодиодный индикатор питания зарядного устройства «СЕТЬ»;
- разъем внешнего пуска «ПУСК»;
- разъем «ДИСТ. УПР.» для подключения пульта управления;
- разъем «БЛОКИРОВКА» для подключения контакта блокировки зарядки.

На противоположной панели расположен высоковольтный разъем «ГИН» для подключения высоковольтного блока.

Зарядное устройство совместно с выносным пультом управления служит для формирования импульса высокого напряжения 10 кВ, который по кабелю подается на высоковольтный блок.

ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ

Выносной пульт (рис. 2.4) управляет зарядкой накопительных конденсаторов зарядного устройства и их разрядкой на нагрузку. Выключатель «ЗАРЯДКА» управляет работой высоковольтного высокочастотного преобразователя. В положении «ВКЛЮЧЕНО» преобразователь заряжает накопительные конденсаторы до номинального напряжения. Далее происходит поддержка напряжения на заданном уровне.

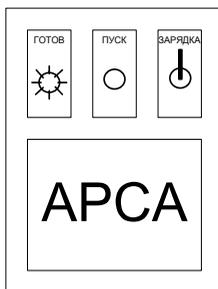


Рис. 2.4. Выносной пульт управления импульсного ускорителя АРСА

Светодиод «ГОТОВ» горит при зарядке накопительных конденсаторов до номинального напряжения.

Кнопка «ПУСК» управляет формирователем сигнала поджига коммутирующего разрядника. При нажатии на эту кнопку энергия, накопленная в конденсаторах зарядного устройства, передается в нагрузку (ГИН).

БЛОКИРОВКА

Цепь блокировки подсоединяется к разъему «БЛОКИРОВКА» на боковой панели зарядного устройства. Зарядное устройство заблокировано и не может быть заряжено, если контакт блокировки разомкнут. Контакт и соединительный провод в комплектацию ускорителя АРСА не входят и обеспечиваются силами потребителя. Ускоритель комплектуется только разъемом XS1 типа РС4ТВ.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Требования по климатическим условиям эксплуатации импульсного ускорителя АРСА приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Наименование влияющей величины	Нормальные условия	
	Номинальное значение	Допустимое отклонение
Температура, °С	20	± 15
Атмосферное давление, мм рт.ст.	760	± 50

ПОДГОТОВКА УСКОРИТЕЛЯ АРСА К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

Все постоянно работающие на импульсном ускорителе АРСА должны знать и выполнять правила техники безопасности, устройство и правила эксплуатации электроустановок потребителей. В приложении к техническому описанию установки приведен полный перечень правил и инструкций, которыми необходимо руководствоваться при подготовке и проведении работ на импульсном ускорителе АРСА, а также при его техническом обслуживании.

В зарядном устройстве имеются цепи с напряжением до 10 кВ, поэтому разбирать зарядное устройство допускается только представителям разработчика.

Не допускается эксплуатация импульсного ускорителя АРСА:

- при наличии повреждений в сетевом шнуре, а также в высоковольтном кабеле и кабеле управления;

- при вытекании масла из высоковольтного блока;
- при нарушении целостности выходного окна ускорительной трубки.

Защитное заземление корпуса зарядного устройства, а через высоковольтный кабель и высоковольтного блока, осуществляется при помощи трехполусного сетевого соединения.

Помещение, в котором находится импульсный ускоритель АРСА, по условиям пожарной безопасности по ПУЭ должно относиться к классу «нормальные» и оборудовано противопожарной сигнализацией, а по характеру производства – к категории В «пожароопасные». По условиям электробезопасности – «с повышенной опасностью».

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЯ АРСА

Эксплуатация ускорителя АРСА согласно СТП А 4424-84 относится к категории работ повышенной опасности, а по степени опасности – к опасным работам. Работа на ускорителе АРСА производится не менее чем двумя сотрудниками.

При работе ускорителя АРСА без дополнительной биологической защиты персонал должен находиться в местах наименьшего воздействия ионизирующего излучения в соответствии с картой полей доз рентгеновского излучения.

Находиться и производить какие-либо работы вблизи выходного окна ускорительной трубки можно только при выключенном тумблере «СЕТЬ» на зарядном устройстве (индикаторные светодиоды не горят).

ВКЛЮЧЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ АРСА

Включить вилку шнура питания в сеть 220 В. Включить тумблер «СЕТЬ» в положение «ВКЛ.» на панели зарядного устройства. При этом должны загореться индикаторные светодиоды на зарядном устройстве.

Для однократного пуска ускорителя с помощью пульта управления необходимо выполнить следующие действия:

- включить выключатель «ЗАРЯДКА» на пульте управления;
- подождать пока загорится светодиод «ГОТОВ»;

- выключить выключатель «ЗАРЯДКА» и в течение 10 с нажать кнопку «ПУСК». При подаче серии импульсов выключатель «ЗАРЯДКА» после каждого пуска ускорителя можно не выключать, однако действия оператора при подаче последнего импульса в серии аналогичны действиям при однократном пуске ускорителя.

Внимание! Ускоритель обеспечивает минимальное время между импульсами 2 с. В режиме набора дозы оптимальный интервал времени между импульсами составляет не менее 20 с.

Порядок запуска ускорителя от сигнала внешнего генератора аналогичен изложенному выше. Единственное отличие – вместо нажатия на кнопку «ПУСК» пульта управления подается сигнал от внешнего генератора на разъем внешнего пуска «ПУСК» на зарядном устройстве.

Внимание! Запрещено разъединять кабели ускорителя АРСА при включенном тумблере «СЕТЬ» или горящем светодиоде «ГОТОВ» на пульте управления.

ВЫКЛЮЧЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ АРСА

Выключить выключатель «ЗАРЯДКА» на пульте и разрядить накопительные конденсаторы зарядного устройства, нажав кнопку «ПУСК». Если светодиод «ГОТОВ» погас и более не загорается, можно выключить выключатель «СЕТЬ» на зарядном устройстве. После этого вынуть сетевой шнур из розетки.

ДЕЙСТВИЕ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Аварийной ситуацией при работе на ускорителе АРСА считается:

- сильные хлопки, посторонние звуки в высоковольтном блоке или зарядном устройстве при пусках ускорителя;
- вытекание масла из высоковольтного блока.

В случаях возникновения аварийных ситуаций необходимо отключить напряжение. В случае вытекании масла привести высоковольтный блок в вертикальное положение и разгерметизировать его, отвинтив болты.

2.2.2. Защитный бокс и устройство перемещения

Защитный бокс моделирующей установки АРСА является биологической защитой персонала от воздействия ионизирующего излучения при работе импульсного ускорителя АРСА. Толщина стенок защитного бокса составляет 2 см свинца. Защитный бокс размещен в отдельном помещении. В нем смонтировано устройство перемещения, которое обеспечивает вертикальное перемещение высоковольтного блока импульсного ускорителя АРСА. Основные технические характеристики устройства перемещения приведены ниже:

- Диапазон перемещения, м не менее 1
- Точность перемещения, мм 0,5
- Максимальная скорость перемещения
высоковольтного блока, см/с не хуже 1

Устройство перемещения позволяет задавать уровень воздействия на объект путем изменения расстояния от объекта до выходного окна рентгеновской трубки (рис. 2.5).

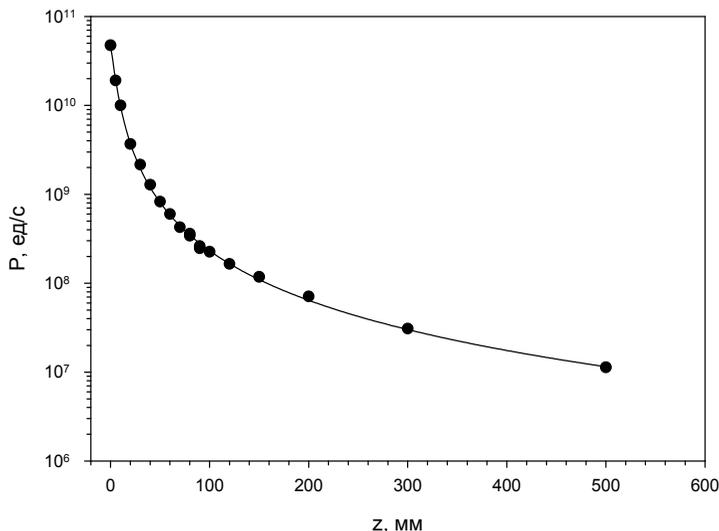


Рис. 2.5. Зависимость мощности поглощенной дозы от расстояния от объекта до выходного окна рентгеновской трубки импульсного ускорителя АРСА

2.2.3. Дозиметрическая установка ДТУ-01М

Дозиметрическая установка ДТУ-01М (рис. 2.6) предназначена для измерения поглощенной дозы излучения путем считывания информации методом термостимулированной люминесценции, накопленной детекторами при индивидуальном дозиметрическом контроле и радиационном контроле окружающей среды, а также при решении других дозиметрических задач.

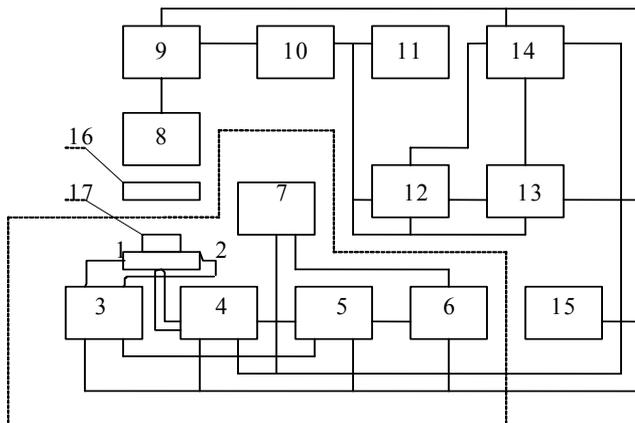


Рис. 2.6. Блок-схема дозиметра ДТУ-01М:

- 1 – нагревательный элемент; 2 – термопара; 3 – электронный регулятор; 4 – усилитель напряжения термопары; 5 – компаратор; 6 – генератор линейно-изменяющегося напряжения; 7 – устройства задания скорости нагрева; 8 – ФЭУ; 9 – преобразователь фототока; 10 – масштабный усилитель с автоматическим переключением диапазонов; 11 – КСП-4; 12 – блок регистрации экстремумов фототока; 13 – преобразователь «напряжение – частота»; 14 – частотомер с цифровой индикацией и формирователем счетных интервалов; 15 – источник питания; 16 – светофильтр; 17 – детектор

Дозиметр состоит из блока отжига (БО), пульта управления (ПУ), блока термовысвечивания (БТВ) и детекторов (разных типов).

Технические данные: ПУ обеспечивает питание БТВ, обработку поступающей от БТВ информации и преобразование ее к виду, обеспечивающему возможность записи в цифровом и аналоговом виде и дающему возможность регистрации всей кривой термовысвечивания.

Переключение поддиапазонов осуществляется автоматически или ручным способом.

Время установления рабочего режима дозиметра не более полу- часа. Время, необходимое для снятия информации с одного детек- тора, не более 60 с.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ДОЗИМЕТРА

Метод регистрации доз ионизирующего излучения основан на способности некоторых кристаллических веществ – люминофоров запасать и длительно сохранять часть поглощенной энергии. При нагревании облученный термолюминофор испускает свет – термо- люминесценцию, интенсивность максимума которой I_{\max} (пиковый метод) или светосумма S (интегральный метод) пропорциональны поглощенной дозе. В данном приборе используется пиковый метод измерения. Пульт управления состоит из передней (рис. 2.7) и зад- ней (рис. 2.8) панелей.

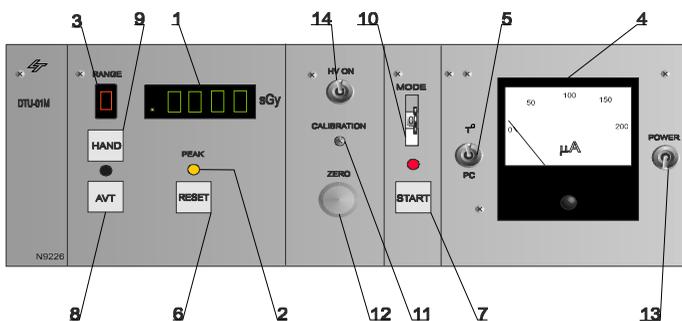


Рис. 2.7. Передняя панель ПУ:

1 – цифровое табло 4-разрядное с плавающей запятой; 2 – светодиод индикации прохождения пика КТВ; 3 – цифровое табло разряда поддиапазона; 4 – стрелочный индикатор изменения температуры (полная шкала 400 °С); 5 – тумблер переключения режима стрелочного индикатора (фототок – температура); 6 – клавиша сбора информации; 7 – клавиша включения-выключения нагрева с индикацией режима работы; 8 – клавиша включения автоматического выбора диапазона измерения с индикацией включения; 9 – клавиша ручного переключения поддиапазонов измерений ($10^{-3} \div 50$ Гр); 10 – переключатель режима нагрева (0 – Al_2O_3 – линейный режим, 2 – Al_2O_3 – с ускоренным участком, 1 – LiF – линейный режим, 3 – LiF – с ускоренным участком); 11 – регулировка чувствительности дозиметра; 12 – ручка компенсации темнового тока ФЭУ; 13 – тумблер включения и выключения дозиметра; 14 – тумблер включения высокого напряжения

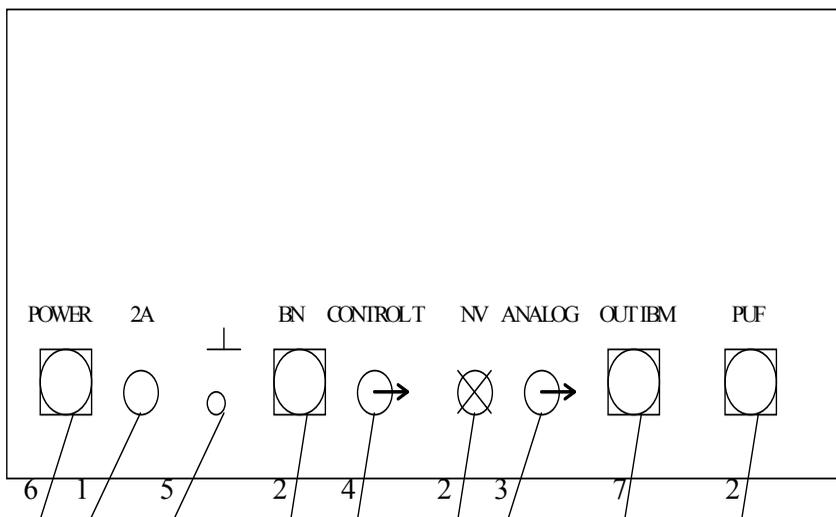


Рис. 2.8. Задняя панель ПУ:

1 – держатель предохранителя; 2 – разъемы подключения выносного блока термовысвечивания; 3 – аналоговый выход для регистрации КТВ; 4 – аналоговый выход для контроля температурного режима; 5 – клемма заземления; 6 – разъем подключения дозиметра к сети; 7 – разъем подключения ЭВМ

В выносном блоке термовысвечивания (рис. 2.9) находится плата нагрева с нагревательным элементом, закрепленным в корпусе 1. На корпусе крепится станина, имеющая камеру высвечивания 2 и поворотный диск 3 со светозащитной крышкой 4 и рукояткой 5. В светонепроницаемом кожухе 6 установлен ФЭУ-140. Фиксация поворотного диска с ФЭУ в положении «Калибровка» и «Измерение» осуществляется при помощи упоров 7, установленных на станине. Загрузка детекторов осуществляется при положении «Калибровка». Для подвода в камеру высвечивания инертного газа или азота в станине имеется штуцер 8. В специальном углублении станины установлен радиолуминесцентный источник, изготовленный в ЛТИ им. Ленсовета, в состав которого входит бета-нуклид ^{14}C , с помощью которого осуществляется калибровка регистрирующего тракта прибора ($\lambda = 440 \text{ нм}$, $N = 10^9 \text{ кв/с}$).

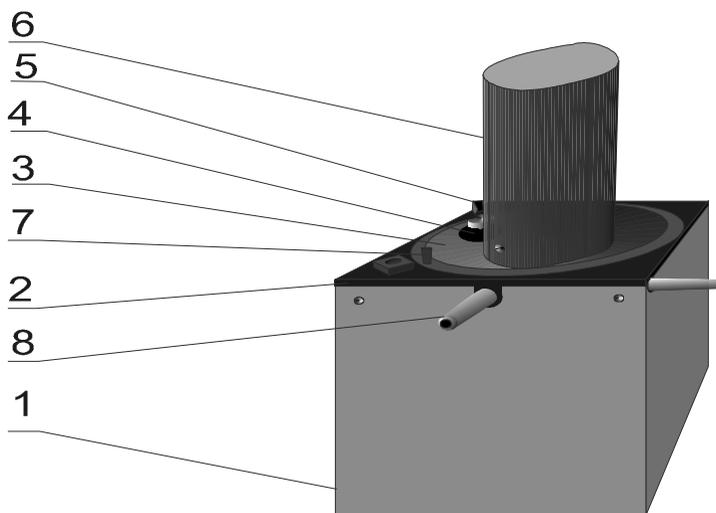


Рис. 2.9. Блок термовысвечивания

Процедура проведения исследований на приборе ДТУ-01М проста, не требует специальной квалификации и заключается в следующем.

После включения и прогрева прибора необходимо установить правильный режим нагрева для используемого типа детекторов (mode: 0 – SiO_2 , Al_2O_3 ; 1 – LiF). Провести холостой прогон. Провести калибровку, установить «0». Для проведения измерений следует снять светозащитную крышку, положить детектор на нагревательный элемент и закрыть крышкой. Повернуть диск блока термовысвечивания по часовой стрелке до упора (положение «от себя»). Нажать клавишу «пуск». После фиксации прибором пика ТСЛ происходит автоматическое отключение нагрева и высвечивание на цифровом табло значения дозы в сГр.

3. Лабораторная работа

3.1. Цели и задачи лабораторной работы

Целью работы является ознакомление с особенностями проявления радиационных эффектов в БИС ОЗУ при воздействии импульсного ионизирующего излучения (ИИИ) на примере БИС ОЗУ различных технологий: К537РУ6, К132РУ5, К541РУ1.

3.2. Объекты исследования

Объектами исследований являются образцы БИС ОЗУ следующих типов:

- К537РУ6 – статическое ОЗУ с организацией $4К \times 1$, выполненное по КМОП технологии;
- К132РУ5 – статическое ОЗУ с организацией $4К \times 1$, выполненное по *n*-МОП технологии;
- К541РУ1 – статическое ОЗУ с организацией $4К \times 1$, выполненное по биполярной ИИЛ-ТТЛШ технологии.

3.3. Подключение исследуемых БИС ОЗУ к экспериментальной установке

Исследования радиационного поведения БИС ОЗУ при воздействии ИИИ проводятся по методу 1000-2 ОСТ 11 073.013 (ч.10) с использованием моделирующей установки АРСА. Для функционального контроля и контроля статических параметров во время воздействия используется автоматизированный испытательный аппаратно-программный комплекс АПИК-0201 (ЭНПО СПЭЛС), структурная схема которого приведена на рис. 3.1.

Схемы подключения исследуемых БИС ОЗУ к элементам испытательного комплекса показаны на рис. 3.2 и 3.3.

БИС ОЗУ устанавливается в контактирующее устройство, расположенное на плате исследуемого объекта (ПИО). ПИО располагается в зоне облучения, на нем смонтированы блокирующие конденсаторы (**C1**, **C2**), резистивная нагрузка (**R1**, **R2**) и токосъемный резистор **R3**. Питание подается на микросхему через коаксиальный кабель от регулируемого источника питания. Источник питания должен иметь индикатор (или измеритель) выходного тока. Сигнал с токосъемного резистора **R3** передается на осциллограф через согласованный коаксиальный кабель.

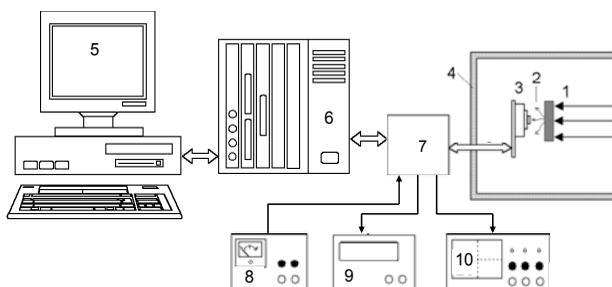


Рис. 3.1. Структура испытательного комплекса для радиационных испытаний БИС:

- 1 – поток электронов, падающий на мишень; 2 – тормозное рентгеновское излучение; 3 – плата с испытываемой БИС; 4 – защищенная комната; 5 ÷ 7 – аппаратно-программный комплекс АПИК-0201 (ПЭВМ – 5, блок функционального контроля БФК – 6, блок согласования и коммутации – 7; 8 – внешние источники питания; 9 – внешние вольтметры и амперметры; 10 – быстродействующий цифровой осциллограф типа TDS-1012

Сигнал с выхода БИС снимается стандартным щупом осциллографа.

БИС ОЗУ подключается к блоку функционального контроля экранированным многожильным сигнальным кабелем, экран кабеля подключается к физической земле экспериментальной установки.

3.4. Методы контроля параметров БИС ОЗУ при проведении исследований

Параметры БИС ОЗУ, которые контролируются и исследуются в ходе лабораторной работы, приведены в табл. 3.1, 3.2 и 3.3.

Задание режимов работы БИС, задание и контроль сигналов при функциональном контроле обеспечиваются БФК под управлением специализированного программного обеспечения. Регулировка напряжения питания осуществляется вручную.

Контроль параметров U_{OH} (U_{OL}) проводится при напряжении питания $U_{CC} = 4,5$ В в режиме статической выборки логической «1» и «0». Предварительно в БИС записывается код «шахматный». Логические уровни на адресных входах, при которых осуществляется статическая выборка, определяются при считывании из накопителя при последовательном переборе логических адресов. При воздействии осциллографом регистрируются импульсы напряжения на выходе.

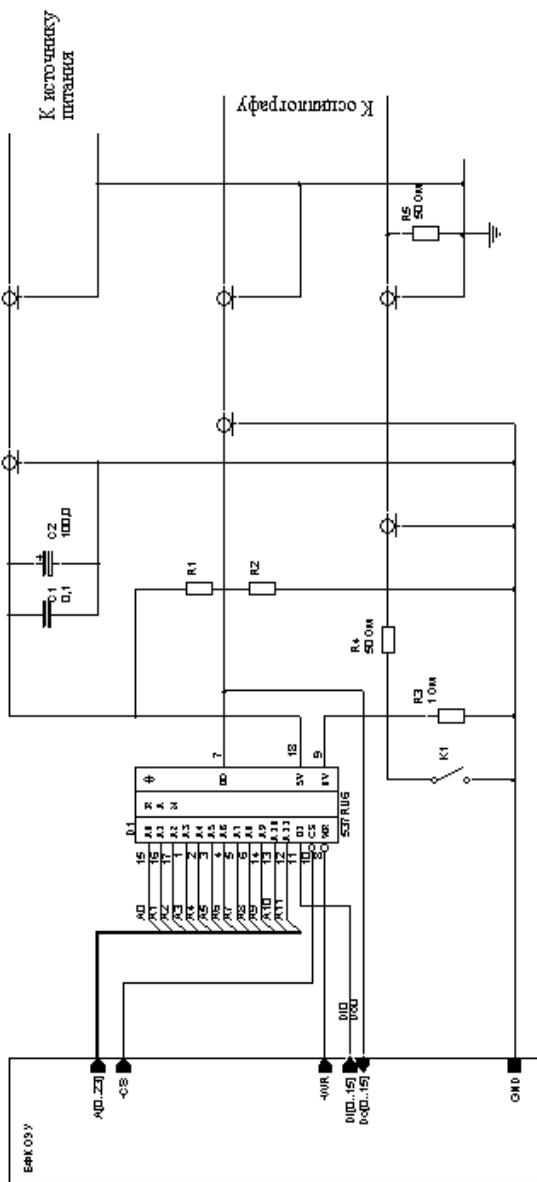


Рис. 3.2. Схема подключения БИС ОЗУ К537РУ6 и К132РУ5 к элементам экспериментального комплекса:

$R1 = 3,3 \text{ кОм}$; $R2 = 1,5 \text{ кОм}$ для БИС К537РУ6;

$R1 = 430 \text{ Ом}$; $R2 = 270 \text{ Ом}$ для БИС К132РУ5

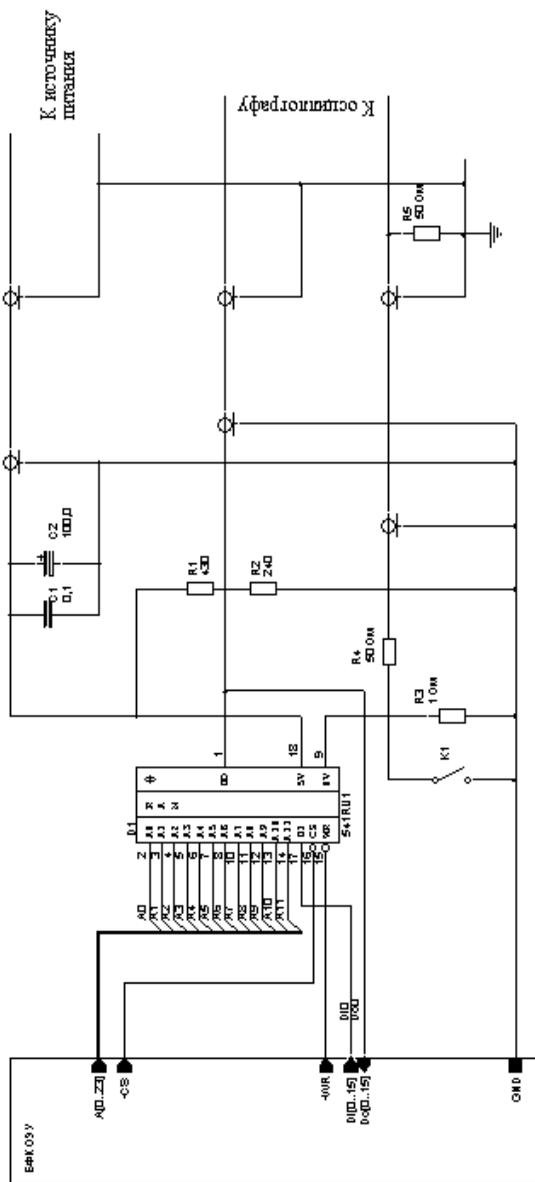


Рис. 3.3. Схема подключения БИС ОЗУ К541РУ1 к элементам экспериментального комплекса

Таблица 3.1

Параметры-критерии работоспособности БИС К537РУ6

Контролируемые параметры	Режим измерения	Критерии работоспособности
Выходное напряжение высокого уровня, U_{OH} , В	$U_{CC} = 4,5$ В $I_{OH} = 1$ мА	$\geq 2,4$
Выходное напряжение низкого уровня, U_{OL} , В	$U_{CC} = 4,5$ В $I_{OL} = 1$ мА	$\leq 0,4$
Время потери работоспособности, мс	$U_{CC} = 4,5$ В Динамический режим	≤ 2
Контроль функционирования	$U_{CC} = 4,5$ В	Отсутствие ошибок функционального контроля, сохранность информации
Контроль тиристорного эффекта (ТЭ)	$U_{CC} = 5,5$ В	Отсутствие ТЭ
Контроль катастрофических отказов (КО)	$U_{CC} = 5,5$ В	Отсутствие КО
Импульсный ток потребления I_{CCP}	$U_{CC} = 5,5$ В	Определяется зависимость

Таблица 3.2

Параметры-критерии работоспособности БИС К132РУ5

Контролируемые параметры	Режим измерения	Критерии работоспособности
Выходное напряжение высокого уровня, U_{OH} , В	$U_{CC} = 4,5$ В $I_{OH} = 4$ мА	$\geq 2,4$
Выходное напряжение низкого уровня, U_{OL} , В	$U_{CC} = 4,5$ В $I_{OL} = 8$ мА	$\leq 0,4$
Время потери работоспособности, мс	$U_{CC} = 4,5$ В Динамический режим	≤ 2
Контроль функционирования	$U_{CC} = 4,5$ В	Отсутствие ошибок функционального контроля, сохранность информации
Контроль тиристорного эффекта (ТЭ)	$U_{CC} = 5,5$ В	Отсутствие ТЭ
Контроль катастрофических отказов (КО)	$U_{CC} = 5,5$ В	Отсутствие КО
Импульсный ток потребления I_{CCP}	$U_{CC} = 5,5$ В	Определяется зависимость

Таблица 3.3

Параметры-критерии работоспособности БИС К541РУ1

Контролируемые параметры	Режим измерения	Критерии работоспособности
Выходное напряжение высокого уровня, U_{OH} , В	$U_{CC} = 4,5$ В $I_{OH} = 5,2$ мА	$\geq 2,4$
Выходное напряжение низкого уровня, U_{OL} , В	$U_{CC} = 4,5$ В $I_{OL} = 8$ мА	$\leq 0,45$
Время потери работоспособности, мс	$U_{CC} = 4,5$ В Динамический режим	≤ 2
Контроль функционирования	$U_{CC} = 4,5$ В	Отсутствие ошибок функционального контроля, сохранность информации
Контроль тиристорного эффекта (ТЭ)	$U_{CC} = 5,5$ В	Отсутствие ТЭ
Контроль катастрофических отказов (КО)	$U_{CC} = 5,5$ В	Отсутствие КО
Импульсный ток потребления I_{CCP}	$U_{CC} = 5,5$ В	Определяется зависимость

Контроль времени потери работоспособности (ВПР) в динамическом режиме работы проводится при напряжении питания $U_{CC} = 4,5$ В. Во время воздействия БИС работает в режиме циклической записи-считывания по адресу 0 таким образом, чтобы выходное логическое состояние на выходе чередовалось. При воздействии контролируется искажение временной диаграммы по осциллограммам выходного сигнала для определения ВПР.

Контроль катастрофических отказов (КО) и тиристорного эффекта (ТЭ) проводится при напряжении питания $U_{CC} = 5,5$ В в режиме хранения. Возникновение ТЭ контролируется измерителем тока источника питания БИС. При резком возрастании тока потребления БИС следует кратковременно (примерно 1 с) отключить питание БИС (задать потенциал на выводе питания 0 В). После каждого воздействия производится функциональный контроль БИС при напряжении питания $U_{CC} = 4,5$ В. При функциональном контроле применяются линейные алгоритмические функциональные тесты (АФТ) типа «запись-считывание» с информационными кодами «поле 0», «поле 1», «шахматный», «псевдослучайный».

Контроль сохранности информации (СИ) проводится при напряжениях питания $U_{CC} = 4,5$ В в следующей последовательности.

До воздействия во все ячейки памяти БИС записывается тестовый информационный код («поле 0», «поле 1»). Во время воздействия БИС работает в режиме хранения информации. После воздействия производится считывание информации из ячеек памяти БИС и сравнение ее с записанной до воздействия. Количество ошибок при контроле СИ определяется как количество отличий между информационным кодом, считанным после воздействия и записанным до воздействия. Критерием работоспособности является отсутствие ошибок при контроле СИ.

Контроль импульсного тока потребления $I_{ССР}$ проводится при напряжении питания $U_{CC} = 5,5$ В в режиме хранения. На все входы подается напряжение питания. Осциллографом регистрируется амплитуда и форма импульса напряжения на токосъемном резисторе номиналом 1 Ом, включенного в цепь «земли» БИС. Измерения производятся в диапазоне уровней воздействия, соответствующем амплитуде импульса напряжения на токосъемном резисторе не более 2 В.

3.5. Последовательность проведения исследований (рабочее задание)

Запустите специализированное программное обеспечение RAM4K1 в среде WMeasurer на управляющем ПК аппаратно-программного испытательного комплекса АПИК-0201.

Подключите оснастку к модулю БСК АПИК-0201, установите плату исследуемого объекта (ПИО) с соответствующей микросхемой в оснастку. Включите источник питания АПИК-0201. Произведите контрольный запуск программного обеспечения во всех режимах работы.

До начала исследований необходимо провести дозиметрию моделирующей установки АРСА.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОХРАННОСТИ ИНФОРМАЦИИ В БИС ОЗУ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИИИ

В ходе исследований наблюдаются сбои в БИС ОЗУ при воздействии ИИИ, которые проявляются как потеря (инверсия) информации в части ячеек БИС ОЗУ.

Производя серию воздействий с различными уровнями мощности дозы, следует определить максимальный уровень, при котором

информация в БИС ОЗУ еще не искажается – уровень бесбойной работы (УБР) по сохранности информации или уровень сохранности информации (УСИ).

Первый этап исследований проводится для всех типов БИС ОЗУ при напряжении питания 4,5 В с использованием исходных регулярных и гладких тестовых кодов «поле 0» и «поле 1», а также нерегулярного кода «псевдослучайный». Для каждого уровня воздействия фиксируется число сбоев, а если оно ненулевое, то сохраняется вид карты сбоев. Для больших уровней воздействия, когда искажение информации происходит более чем в 50 % ячеек, следует проанализировать структуру информационного кода, который сохраняется в накопителе после воздействия, и сделать вывод о существовании стабильного предпочтительного состояния ячеек, в которые они переходят после рассасывания избыточных носителей в объеме полупроводниковой структуры.

В ходе исследований для каждой БИС заполняется таблица следующей формы:

P , ед./с	N_{CB} «поле 0»	N_{CB} «поле 1»	N_{CB} «псевдослучайный»

Второй этап исследования проводится для всех типов БИС ОЗУ при напряжениях питания 3,5 В и 5,5 В с использованием исходного кода «псевдослучайный». Цель исследований – выявить зависимость УСИ от напряжения питания во время воздействия. Производя серию воздействий с различными уровнями мощности дозы, следует определить УСИ для каждой БИС при различных напряжениях питания. По результатам исследования заполняется таблица следующей формы:

U_{CC} , В	3,5В	4,5В	5,5В
Тип БИС ОЗУ			
К537РУ6			
К132РУ5			
К541РУ1			

Внимание! В БИС ОЗУ К537РУ6 при воздействии ИИИ возникает тиристорный эффект (ТЭ). При номинальном напряжении питания ТЭ возникает раньше, чем проявляются сбои в ячейках памяти, поэтому при проведении исследований следует контролировать ток потребления и при возникновении ТЭ сбрасывать питание БИС ОЗУ. В этом случае результат функционального контроля (считывание и сравнение с эталоном) не имеет смысла, а в таблице следует делать пометку «УТЭ < УСИ».

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА В БИС ОЗУ К537РУ6 И ИМПУЛЬСНОЙ РЕАКЦИИ ТОКА ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ИИИ

Производя серию воздействий с различными уровнями мощности дозы следует определить максимальный уровень, когда тиристорный эффект еще не развивается – уровень тиристорного эффекта (УТЭ).

Исследовать влияние напряжения питания на УТЭ. Определить УТЭ при напряжениях питания 4,5 В и 3,5 В. Сделать выводы о влиянии напряжения питания на УТЭ.

Включить в цепь «земли» БИС токосъемный резистор. Снять осциллограммы тока потребления при уровнях воздействия ИИИ выше и ниже УТЭ при трех напряжениях питания (3,5 В, 4,5 В и 5,5 В). Сравнить осциллограммы, определить характерное время включения паразитной тиристорной структуры. Для напряжения питания 5,5 В снять дополнительные точки зависимости амплитуды ионизационной реакции тока потребления. Увеличение уровня мощности дозы производится до тех пор, пока амплитуда импульса напряжения на токосъемном резисторе не превысит 2 В или до достижения максимального уровня моделирующей установки. Уменьшение уровня воздействия производится до тех пор, пока полезный сигнал с токосъемного резистора достоверно определяется на уровне помех моделирующей установки. При снятии зависимостей амплитуды ионизационной реакции тока потребления при воздействии ИИИ следует более подробно исследовать область мощностей доз вблизи УСИ, следует обязательно получить экспериментальные точки в этой области. В ходе исследований для каждой БИС заполняются таблицы следующей формы:

$P, \text{ ед./с}$	$U_{RC}^{MAX}, \text{ В}$	$I_{ССР}, \text{ А}$

а также строятся графики зависимости амплитуды ионизационной реакции тока от мощности дозы ИИИ.

Снять аналогичные зависимости амплитуды ионизационной реакции тока потребления при воздействии ИИИ для БИС ОЗУ К132РУ5 и К541РУ1. Сохранить типичные осциллограммы для использования в отчете.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ РЕАКЦИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ БИС ОЗУ

В ходе исследований снимаются осциллограммы выходного напряжения высокого и низкого логических уровней и строятся зависимости амплитуды импульса выходного напряжения БИС ОЗУ при ИИИ для БИС ОЗУ К132РУ5 и К541РУ1.

При исследовании ионизационной реакции U_{OL} по осциллограмме определяется максимальное значение выходного напряжения U_{OL}^{MAX} , а также время потери работоспособности (ВПР) как длительность периода времени, на которое уровень сигнала вышел за установленную норму ($U_{OL} > U_{OL}^{KP}$, где U_{OL}^{KP} – критериальный уровень, указанный в таблице).

При исследовании ионизационной реакции U_{OH} по осциллограмме определяется минимальное значение выходного напряжения U_{OH}^{MIN} , а также ВПР как длительность периода времени, на которое уровень сигнала вышел за установленную норму ($U_{OH} < U_{OH}^{KP}$, где U_{OH}^{KP} – критериальный уровень, указанный в таблице).

Производя серию воздействий с различными уровнями мощности дозы, следует определить максимальный уровень, при котором $U_{OL} \leq U_{OL}^{KP}$ ($U_{OH} \geq U_{OH}^{KP}$) – уровень бесбойной работы (УБР) по соответствующему критериальному параметру.

Осциллограммы, снятые при минимальном, максимальном уровнях воздействия, а также две осциллограммы в области УБР следует сохранить для использования в отчете.

В ходе исследований для каждой БИС заполняется таблица следующей формы:

P , ед./с	U_{OL}^{MAX} , В	ВПР ($U_{OL} > U_{OL}^{KP}$)	U_{OH}^{MIN} , В	ВПР ($U_{OH} < U_{OH}^{KP}$)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В ходе исследований снимаются осциллограммы выходного сигнала в режиме записи-считывания чередующегося логического сигнала по фиксированному адресу. По отклонению формы выходного сигнала от исходной (без воздействия) определяют время потери работоспособности, как время целого количества искаженных циклов записи-считывания.

Производя серию воздействий с различными уровнями мощности дозы, следует построить зависимость ВПР в динамическом режиме от уровня воздействия ИИИ. Осциллограммы, снятые при минимальном, среднем и максимальном уровнях воздействия, следует сохранить для использования в отчете.

3.6. Оформление отчета

Отчет должен содержать кратко сформулированную цель работы, результаты измерений, выводы.

По каждому пункту рабочего задания необходимо привести краткое описание методики измерений, экспериментальные данные (таблицы, осциллограммы, рисунки карт ошибок и данных), результаты обработки экспериментальных данных (графики), выводы о характере поведения БИС ОЗУ и ее конкретных параметров при воздействии ИИИ, сравнительный анализ радиационного поведения БИС ОЗУ, выполненный по различным технологиям.

Список основных сокращений

БИС – большая интегральная схема
БТЭ – биполярные транзисторные элементы
ВАХ – вольт-амперная характеристика
ГИН – генератор импульсного напряжения
ГОСТ – государственный стандарт
ЗУ – запоминающее устройство
ИИ – ионизирующее излучение
ИИИ – импульсное ионизирующее излучение
ИР – ионизационная реакция
ИС – интегральная схема
КМОП – комплиментарная МОП структура
ЛПЭ – линейные потери энергии
МОП – структура металл-окисел-полупроводник
МОПТЭ – МОП транзисторные элементы
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ОПЗ – область пространственного заряда
ОСТ – отраслевой стандарт
ПП – полупроводниковый
ПУЭ – правила устройства электроустановок
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
ТЗЧ – тяжелые заряженные частицы
ТУ – технические условия
ТЭ – тиристорные элементы
ЭЭС – эквивалентная электрическая схема

Список литературы

1. Попов В.Д. Радиационная физика приборов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник. Учебное пособие. – М.: МИФИ, 1984.
2. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994.

**Артамонов Алексей Сергеевич
Согоян Армен Вагоевич
Яненко Андрей Викторович**

**РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В БИС ОЗУ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА МОДЕЛИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКЕ АРСА**

Лабораторная работа

Учебное пособие

Редактор Е.Е. Шумакова

Подписано в печать 31.05.2008. Формат 60×84¹/₁₆.
Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 120 экз. Заказ № .
Изд. № 3/9.

Московский инженерно-физический институт (государственный университет),
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31.
Типография «ТРОВАНТ»,
г. Троицк Московской области.