

И. А. Голутвин, Н. В. Горбунов, А. В. Зарубин,
В. Ю. Каржавин, С. А. Мовчан, Г. В. Мещеряков,
В. В. Перелыгин, О. В. Дворников*, А. В. Солин*,
Н. М. Шумейко*, В. А. Чеховский*

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ АНОД**

*Национальный центр физики частиц и высоких энергий, Минск

Электроника регистрации информации с пропорциональных камер с катодным считыванием мюонной станции ME1/1 [1] должна обладать радиационной стойкостью, соответствующей уровню радиации в области расположения детекторов в установке CMS. Моделирование [2] показывает, что электронные платы, помещенные в нижней части камер мюонной станции ME1/1, будут подвержены наиболее сильному облучению. Ожидаемый флюенс заряженных адронов и нейтронов в области ME1/1 за 10 лет эксплуатации LHC ($T=5 \times 10^7$ с) при максимальной светимости коллайдера $L=10^{34}$ см²с⁻¹ составит:

$$\Phi_{n \geq 100 \text{ кэВ}} = 8,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ (флюенс нейтронов с энергией больше 100 кэВ);}$$

$$\Phi_{n \geq 20 \text{ МэВ}} = 2,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ (флюенс нейтронов с энергией больше 20 МэВ);}$$

$$\Phi_{\text{зар. адроны}} = 1,2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ (флюенс заряженных адронов);}$$

$$\Phi_{\text{общий}} = 2,0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ (суммарный флюенс заряженных адронов и нейтронов).}$$

Интегральная доза облучения (TID) составит ~2,9 крад.

1. Характеристика основных радиационных повреждений интегральных схем при работе в радиационных условиях экспериментальных установок на коллайдере LHC

Основные радиационные повреждения интегральных схем (ИС), характерные для радиационных условий экспериментальных установок LHC (рис. 1), классифицируются как:

- кумулятивные эффекты - постепенно проявляющиеся в течение всего срока эксплуатации электроники в определенных радиационных условиях;
- эффекты одиночных событий (SEE) - обусловленные выделением энергии отдельной частицей в электронном устройстве (кристалле интегральной схемы).

Устройства, чувствительные к кумулятивным эффектам, будут давать сбои при превышении допустимого уровня дозы ионизирующей радиации (TID-эффект). Воздействие ионизирующей радиации (ИР) вызывает генерацию электронно-дырочных пар в объеме полупроводника (фототок), что приводит к нагреву и ухудшению свойств ИС. Фототок, вызываемый ИР, пропорционален площади р-п-перехода и интенсивности излучения и спадает после воздействия облучения через промежуток времени, равный времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ). Во время облучения большой фототок может привести к временному и, если не предусмотрено ограничение тока, полному выходу из строя ИС.

TID-эффекты могут приводить к необратимым явлениям, связанным с возникновением встроенного заряда в окисле, создающего промежуточную проводимость. Генерация в окисле электронно-ионных пар приводит к тому, что положительный заряд собирается вблизи поверхности и вызывает инверсию слаболегированных областей р-типа, увеличение областей пространственного заряда (ОПЗ), возрастание скорости поверхностной рекомбинации, а следовательно, уменьшение коэффициента усиления тока, появление дополнительных утечек, изменение порогового напряжения и крутизны МОП-транзисторов, изменение удельной емкости МОП-конденсаторов и удельного сопротивления слаболегированных полупроводниковых резисторов.

В структурах с диэлектрической изоляцией положительный заряд генерируется во всем объеме окисла и может образовывать инвертированные слои в р-подложке и внутренней р-базе вдоль боковых стенок п-р-п-транзистора. Первый эффект приводит к появлению утечки между коллекторами близко расположенных транзисторов, а второй – к утечке коллектор-эмиттер п-р-п-транзистора.

Эффект смещения в транзисторах характеризуется увеличением базового тока с ростом дозы облучения, что объясняется увеличением рекомбинации носителей в базе. Особенно этот эффект характерен для биполярных структур с большой базовой областью (планарные транзисторы).



Рис.1. Основные радиационные повреждения ИС, характерные для экспериментальных установок на коллайдере LHC

Эффекты одиночных событий в противоположность кумулятивным эффектам могут произойти в любой момент времени начиная с момента запуска установки.

Одним из наиболее вероятных источников эффекта изменения состояния перехода (SEU) является облучение ИС тяжелыми ионами. Ионы характеризуются высокой тормозной способностью и выделяют значительную энергию (следовательно, и заряд) в чувствительном объеме полупроводника, что приводит к возникновению SEU.

Радиационное поле LHC в основном определяется заряженными адронами и нейтронами. Плотность ионизации адронов (протоны, пионы) не достаточна для возникновения SEU-эффекта, что является важным положительным моментом. Однако адроны и нейтроны могут служить источником SEU при взаимодействии с ядрами в чувствительном объеме ИС или в его ближайшем окружении. Продукты таких взаимодействий могут иметь энергию, достаточную для возникновения SEU.

Возникновение отказов, обусловленных SEU-эффектами, характеризуется сечением

$$\sigma = \frac{N}{\Phi} \quad (\text{см}^2), \quad (1)$$

где N - количество зарегистрированных событий, Φ (см^{-2}) - флюенс частиц.

Для защиты от SEU-эффекта, особенно проявляющегося в различного рода логических устройствах и устройствах памяти, обычно применяют либо менее чувствительную технологию, либо избыточно защищенную логику.

Иногда выделяемая в чувствительном объеме ИС энергия становится причиной невосстанавливаемых эффектов (рис.1): защелкивания (SEL), нарушения логической функции (SEGR) и даже сгорания электронного устройства (SEBO). Обычно эти эффекты приводят к выходу из строя электронного устройства. Защита от SEL- и SEBO-эффектов осуществляется специальными приемами на уровне разработки системной архитектуры.

Например, предотвращение SEL-эффекта может быть обеспечено защитой по току источников питания, а также входных и выходных цепей электронного устройства. Вероятность возникновения эффекта сгорания SEBO может быть уменьшена ограничением напряжения питания.

2. Программа исследований радиационной стойкости ИС АНОД

ИС АНОД изготовлена по 1,5-мкм микроволновой технологии. Основные активные компоненты микросхемы выполнены на биполярных ($n-p-n$) и полевых ($p-jFET$) транзисторах. К пассивным компонентам относятся интегральные емкости и резисторы. Сечение активной структуры ИС показано на рис.2.

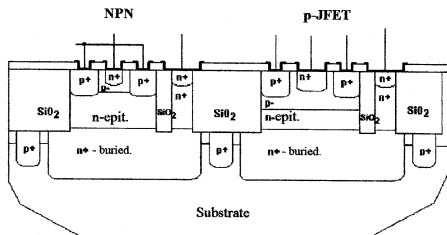


Рис. 2. Сечение активной структуры ИС АНОД

Программа исследований радиационной стойкости ИС АНОД разработана в соответствии с общим планом проверки радиационной стойкости электронных компонентов, применяемых в эксперименте CMS, и включает:

- 1) исследование деградации характеристик ИС вследствие эффекта смещения перехода (displacement), эффект проявляется при облучении нейтронами с энергией $E_n \geq 100$ кэВ;
- 2) исследование деградации характеристик ИС, связанных с интегральной дозой ионизирующей радиации (TID);
- 3) измерение вероятности радиационных повреждений, связанных с эффектами одиночных событий (SEE), при облучении нейтронами с энергией $E_n \geq 20$ МэВ:
 - изменение состояния перехода (SEU);
 - эффект защелкивания (SEL).

Для проведения эксперимента были изготовлены шесть восьмиканальных плат с установленными ИС АНОД. Параметры схем измерялись с эквивалентной емкостью детектора $C_d = 100$ пФ, запаянной на каждый вход ИС. Характеристики всех шести плат были предварительно паспортизированы. Четыре платы предназначались для облучения, а две - для контроля.

Время экспозиций облучения исследуемых образцов соответствовало интегральным значениям флюенса нейтронов и дозы ионизирующей радиации, которые ожидаются при облучении ИС в реальных радиационных условиях мионной станции ME1/1 в течение срока ее эксплуатации ($T=5 \times 10^7$ с), включая фактор безопасности (3÷5).

3. Описание экспериментальной установки

Эксперимент проведен на стенде IRRAD2 канала PS-T8 ускорителя PS (ЦЕРН) [3], предназначенном для исследования радиационной стойкости электронных компонентов. Спектр облучения соответствовал ожидаемому в месте расположения ИС в установке CMS.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3. Исследуемые образцы доставлялись в зону облучения с помощью специального челнока, который перемещался по шахте с сечением 40х40 см и длиной ~40 м, полностью окруженной железной защитой. Исследуемые образцы располагались в зоне, находящейся за графитовой мишенью и отделенной от нее фильтрами из железа толщиной 23 см и из свинца толщиной 10 см.

Автоматизированное управление системой шаговых двигателей перемещения челнока позволило достигнуть высокой точности позиционирования образцов в области облучения. Облучение ИС проводилось в течение нескольких экспозиций, в перерывах между которыми измерялись основные характеристики схем. Во время облучения осуществлялся контроль всех напряжений питания и тока потребления ИС, а также регистрировались срабатывания каждого канала.

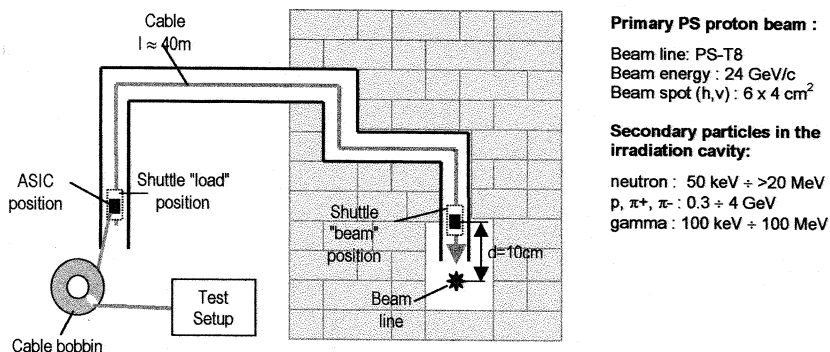


Рис. 3. Схема проведения эксперимента на стенде IRRAD2 (ЦЕРН)

Для выбора местоположения облучаемой ИС, которое определяет интенсивность и спектр облучения, были проведены калибровочные дозиметрические измерения. Поток нейтронов измерялся с помощью активационного анализа образца из алюминиевой фольги (реакция $^{27}\text{Al} (p,3p)n \ ^{24}\text{Na}$).

Детальное изучение результатов измерений и моделирования спектра облучения для различных позиций исследуемого образца относительно пучка [4] позволило сделать вывод, что установка образца на расстоянии $d=10$ см от пучка наиболее полно соответствует ожидаемым радиационным условиям в установке CMS.

В табл. 1 приведены результаты моделирования [4] условий облучения ИС, располагаемой на расстоянии $d=10$ см от пучка:

P_0 - наведенная активность ^{24}Na на 1 г дозиметрического образца (Al);

Q_0 при $E_n > 100$ кэВ - флюенс нейтронов с $E_n > 100$ кэВ на один протон;

Q_0 при $E_n = 2 \div 20$ МэВ - флюенс нейтронов с $E_n = 2-20$ МэВ на один протон;

Q_0 при $E_n > 20$ МэВ - флюенс нейтронов с $E_n > 20$ МэВ на один протон;

R - отношение значений флюенсов нейтронов с $E_n > 100$ кэВ и $E_n > 20$ МэВ;

D - доза облучения на 1 протон;

H - фактор жесткости спектра.

Таблица 1

P_0 (с ⁻¹ ·г ⁻¹)	Q_0 (см ⁻² ·с ⁻¹ /1р)			R	D (Гр/1р)	H
	$E_n > 100$ кэВ	$E_n = 2 \div 20$ МэВ	$E_n > 20$ МэВ			
$4,55 \times 10^{-6}$	$7,01 \times 10^{-2}$	$8,75 \times 10^{-3}$	$6,85 \times 10^{-3}$	10	$1,9 \times 10^{-12}$	0,88

Фактор жесткости спектра (количество радиационных повреждений по сравнению с облучением нейтронами с энергией 1 МэВ) для выбранной позиции составляет $H=0,88$, что сравнимо со значением для спектра CMS: $H_{CMS}=0,9 \div 1,2$.

Значение отношения значений флюенсов нейтронов с порогом по энергии 100 кэВ и 20 МэВ, характеризующее спектр в области высоких энергий, для CMS лежит в пределах $R=2 \div 10$.

Поскольку установка IRRAD2 не имеет точного мониторинга интенсивности и формы первичного протонного пучка, реальный флюенс нейтронов определялся с помощью активационного анализа алюминиевых пластинок, сопровождающих радиационные измерения.

Для компенсации погрешности моделирования расчетные данные, указанные в табл.1, нормированы на измеренные значения. Процедура нормирования состоит в следующем: пусть Q - определяемая величина (флюенс нейтронов или доза) и P - измеренная наведенная активность ^{24}Na дозиметрического образца (Al- фольга), тогда Q определяется следующим выражением:

$$Q = P \times t_i \times Q_0 / P_0, \quad (2)$$

где t_i - время облучения; Q_0 и P_0 - соответствующие величины из табл. 1.

В случае определения эквивалентного флюенса нейтронов с энергией 1 МэВ Q рассчитывается по формуле

$$Q = \Phi_{E_n > 100 \text{ кэВ}} \times H. \quad (3)$$

4. Анализ экспериментальных результатов

4.1 Нейтронный флюенс и интегральная доза облучения ИС АНОД

Полученные результаты (рис.4) показывают, что флюенс нейтронов с $E_n > 100$ кэВ за время семи экспозиций облучения достиг значения $\Phi = 6,3 \cdot 10^{12}$ см⁻², что соответствует

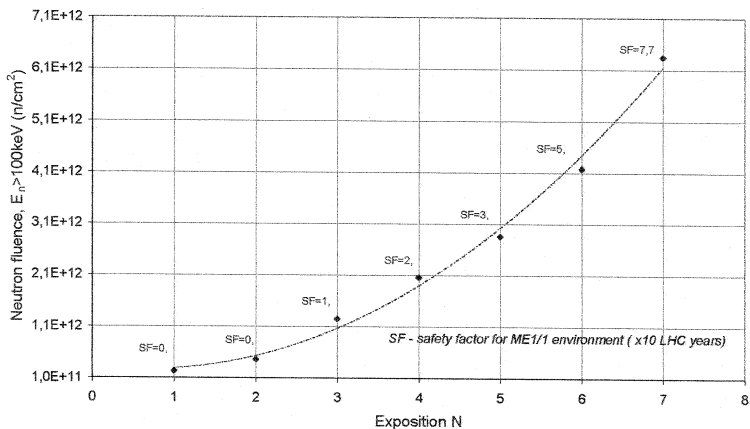


Рис. 4. Флюенс нейтронов с энергиями $E_n > 100 \text{ кэВ}$ за время семи экспозиций облучения ИС АНОД

фактору безопасности $SF \sim 8$ для эксплуатации в радиационных условиях мюонной станции ME1/1 в течение 10 лет работы LHC.

Рост флюенса нейтронов с $E_n > 20 \text{ МэВ}$ в течение облучения показан на рис. 5. Максимальное значение $\Phi = 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ соответствует 30 годам эксплуатации ИС в условиях мюонной станции ME1/1 ($SF \sim 3$).

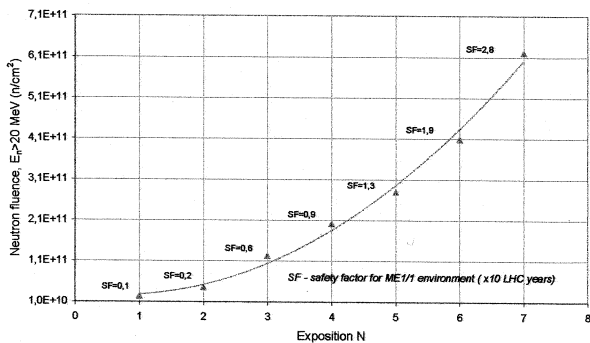


Рис. 5. Флюенс нейтронов с энергиями $E_n > 20 \text{ МэВ}$ за время семи экспозиций облучения ИС АНОД

Значения полной ионизационной дозы (TID), накопленной каждой ИС в течение семи экспозиций облучения, показаны на рис.6. Расчетная кривая получена на основе величины TID $D = 1,9 \times 10^{-12} \text{ Гр/1р}$, взятой из табл. 1. Максимальное рассчитанное значение дозы TID составляет 190 Гр.

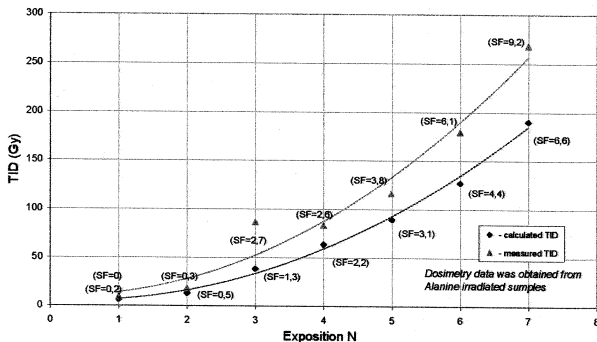


Рис. 6. Значения полной ионизационной дозы облучения (ТІД), накопленной каждой ІС в течение семи экспозиций

Величина измеренного значения полной дозы ионизационного облучения составляет 268 Гр, что соответствует фактору безопасности SF~9 для эксплуатации ІС в радиационных условиях мюонной станции ME1/1.

4.2 Исследование деградации основных параметров ІС АНОД

В табл. 2 приведены основные параметры, которые контролировались в процессе облучения ІС АНОД.

Параметр		Значение до облучения
Напряжение источника питания	U_{cc} (В)	5
Ток источника питания	I_{ASIC} (мА)	50
Напряжение управления коэф. усиления	U_{gain} (В)	1,35
Напряжение на выходе формирователя	U_{DC} (В)	2,8
Референсное напряжение	U_{ref} (В)	0,8
Длительность выходного импульса	$t_{им}$ (нс)	40
Время прохождения сигнала через схему	$t_{зад}$ (нс)	45
Коеф. преобразования	G (мВ/фКл)	10
Порог дискриминатора ($U_{пор}=50$ мВ)	Th (фКл)	12
Порог дискриминатора ($U_{пор}=100$ мВ)	Th (фКл)	17
Шумы	ENC (e)	7000

Анализ представленных на рис. 7 - 14 зависимостей показывает, что значительной деградации параметров ІС во время облучения не наблюдалось вплоть до значения нейтронного флюенса $\Phi_{En>100 \text{ кэВ}} \approx 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, которое соответствует фактору безопасности ~8 для рабочих условий мюонной станции ME1/1. При этом доза ионизационного облучения была превышена приблизительно в 9 раз.

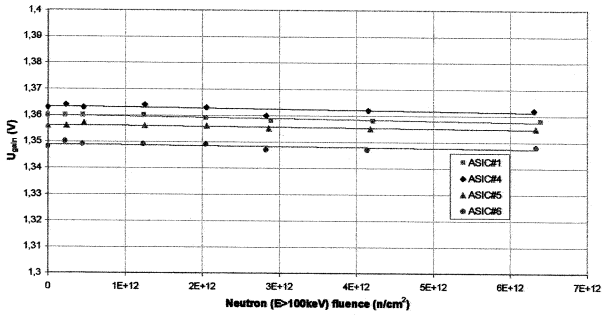


Рис. 7. Зависимость напряжения управления коэффициентом усиления от нейтронного флюенса

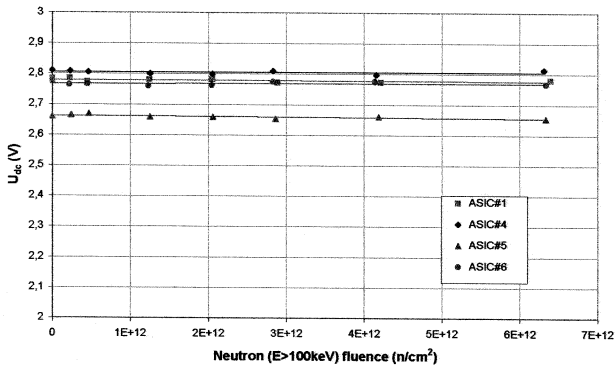


Рис. 8. Зависимость напряжения на выходе формирователя от нейтронного флюенса

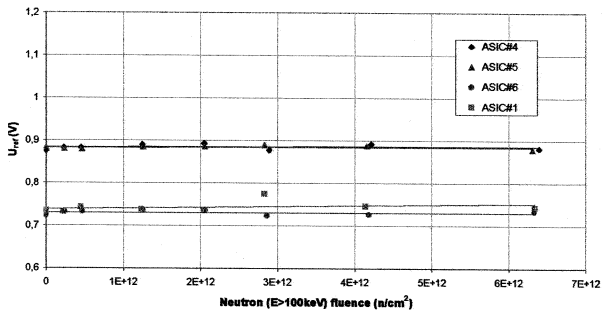


Рис. 9. Зависимость референсного напряжения от нейтронного флюенса

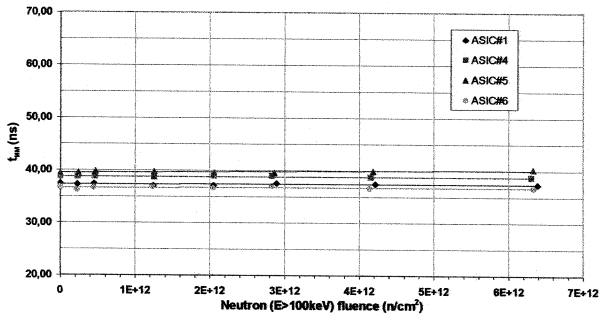


Рис. 10. Зависимость длительности выходного импульса от нейтронного флюенса

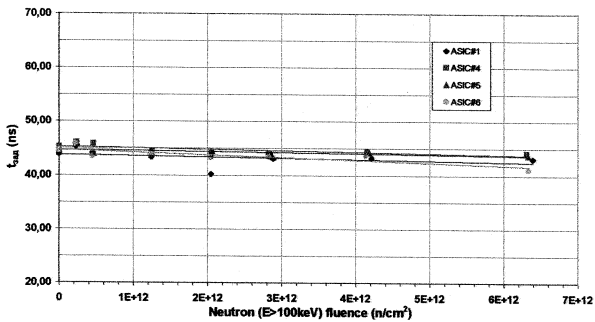


Рис. 11. Зависимость времени прохождения сигнала через схему от нейтронного флюенса

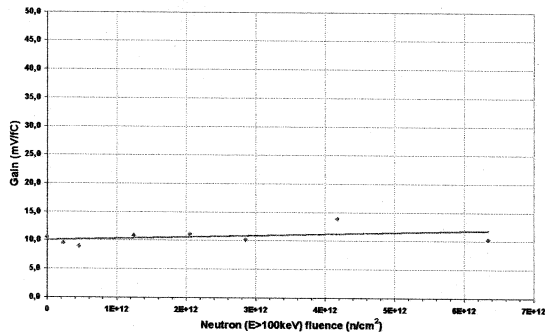


Рис. 12. Среднее значение коэффициента преобразования усилителя в зависимости от нейтронного флюенса

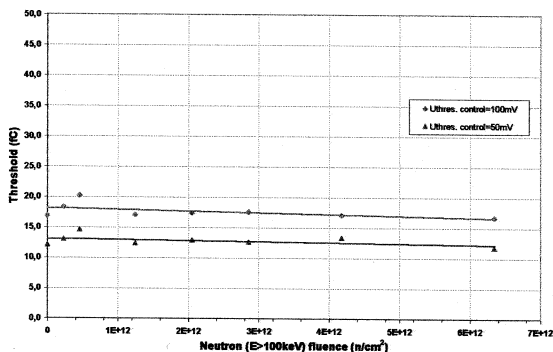


Рис. 13. Порог срабатывания дискриминатора в зависимости от нейтронного флюенса

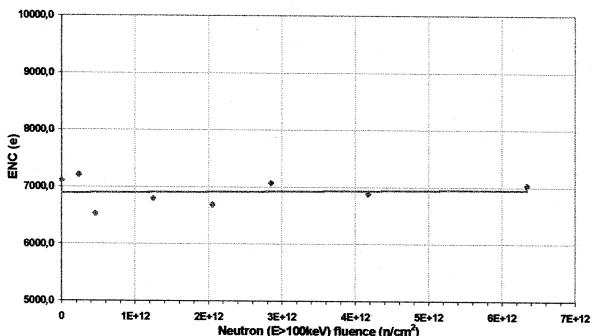


Рис. 14. Зависимость шумов от нейтронного флюенса

4.3. Исследование эффектов одиночных событий (SEE) при облучении ИС АНОД нейтронами с энергией $E > 20$ МэВ

Радиационные повреждения, связанные с эффектами одиночных событий (SEE) [4,5], исследовались при облучении нейтронами с $E_n \geq 20$ МэВ.

Исследование эффекта защелкивания (SEL)

Для регистрации SEL-эффекта, а также для предохранения схемы от возможных необратимых последствий, связанных с SEE-эффектами, был разработан специальный блок регистрации. Функциональная схема блока представлена на рис. 15.

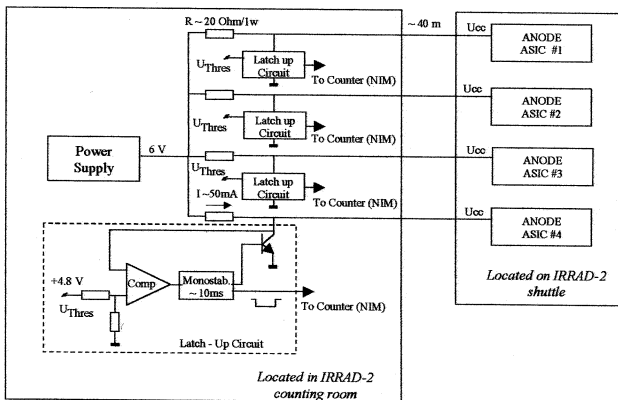


Рис. 15. Функциональная схема блока регистрации SEL-эффекта

Основное назначение блока - защита ИС по току. Порог компаратора подбирался таким образом, что при превышении заданной величины тока источника питания (в нашем случае 1 мА) ток потребления ИС ограничивался на время срабатывания одновибратора $T \sim 10$ мс. Сигнал с выхода одновибратора подавался на счетчик, контролируемый в процессе облучения ИС.

Результаты эксперимента показали отсутствие SEL-эффекта вплоть до максимального флюенса нейтронов $\Phi = 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, который соответствует фактору безопасности $SF \sim 3$.

Исследование эффекта изменения состояния перехода (SEU)

События (счет) регистрировались с каждого канала облучаемой ИС в течение семи экспозиций. Общее время облучения составило 5 часов.

На рис. 16 представлено среднее значение сечения (σ) регистрации SEU-эффекта для четырех облученных ИС (всего 32 канала) в зависимости от величины нейтронного флюенса. Значение порога дискриминатора во время измерений $T_h = 18$ фКл ($U_{th} = 100$ мВ).

Сечение SEU-эффекта было измерено для различных значений порогов дискриминатора ИС. На рис. 17 представлена зависимость сечения SEU (σ) от напряжения управления порогом дискриминатора.

Экспериментальные результаты показывают, что частота регистрируемых SEU эквивалентна ~ 2 SEU/мин на канал и слабо зависит от флюенса нейтронов вплоть до значения $\Phi = 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Если отнормировать частоту SEU на время облучения в течение 10 лет работы LHC, то получим эквивалентную среднюю частоту SEU для одного канала ИС $f < 10$ SEU/сутки. Сравнивая полученную величину с ожидаемым уровнем фоновых загрузок в области мюонной станции ME1/1 ~ 100 кГц/канал, можно утверждать, что для рассматриваемых условий облучения влияние SEE-эффектов на работу ИС АНОД незначительно.

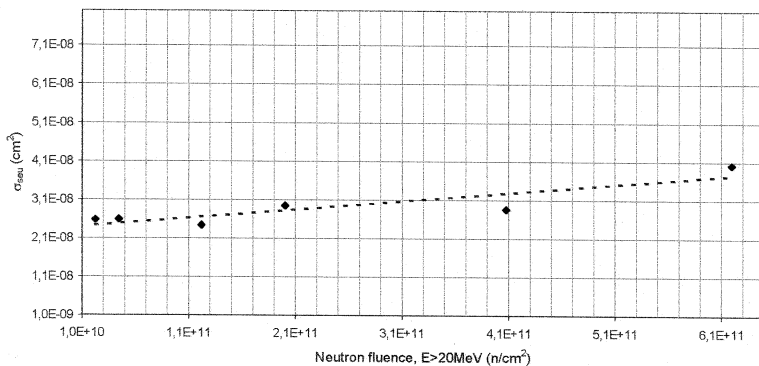


Рис. 16. Зависимость среднего значения сечения регистрации SEU-эффекта от величины нейтронного флюенса

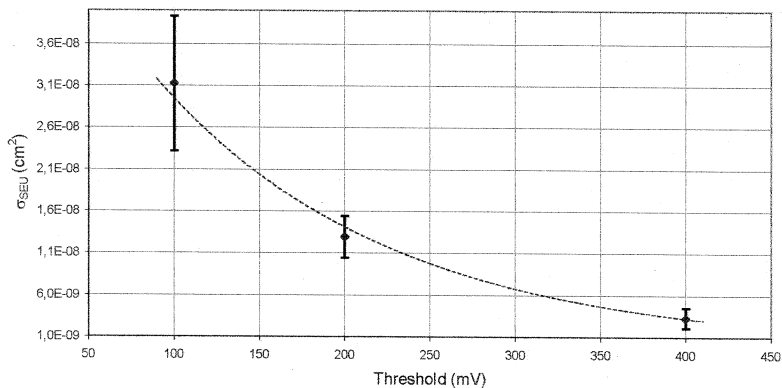


Рис. 17. Зависимость сечения SEU-эффекта от напряжения управления порогом дискриминатора

Заключение

Экспериментальное исследование радиационной стойкости ИС АНОД проведено в условиях, максимально приближенных к ожидаемым в месте расположения ИС в установке CMS. Спектр облучения соответствовал ожидаемому. Время экспозиций облучения исследуемых образцов соответствовало ожидаемым значениям интегрального флюенса нейтронов и дозе ионизирующей радиации в реальных радиационных условиях мюонной станции ME1/1 в течение срока ее эксплуатации ($T=5 \times 10^7$ с), включая фактор безопасности (не менее трех). Флюенс нейтронов за время семи экспозиций облучения достиг значений: $\Phi_n \geq 100 \text{ кэВ} = 6,3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (фактор безопасности ~8); $\Phi_n \geq 20 \text{ кэВ} = 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (фактор безопасности ~3), а измеренное значение полной дозы ионизационного облучения составило 268 Гр (фактор безопасности ~9).

Полученные экспериментальные результаты показали, что деградация параметров ИС АНОД не наблюдалась для указанных выше пределов облучения, связанных с кумулятивными эффектами воздействия ионизирующей радиации. Показано также, что влияние эффектов одиночных событий SEE на работу ИС АНОД несущественно.

Таким образом, можно сделать вывод, что радиационная стойкость ИС АНОД удовлетворяет требованиям ее эксплуатации в условиях мюонной станции ME1/1 установки CMS.

Литература

1. G.L.Bayatian et al., CMS Collaboration, CMS. The Muon Project Technical Design Report, CERN/LHCC 97-32 CMS TDR 3, pp. 1-441, 15 December 1997.
2. M. Huhtinen, Optimisation of the CMS forward shielding, CMS NOTE-2000/068.
3. M.Glaser et al., Proc. RADECS'99 Conference, <http://irradiation.web.cern.ch/irradiation/irrad2.htm>.
4. M. Huhtinen, Recommendations for Irradiations of CMS Components in the IRRAD2 Facility at PS, CMS IN-2001/012.
5. F. Facio, C. Detchevery, M. Huhtinen, First evaluation of the Single Event Upset (SEU) risk for electronics in CMS experiment, CMS NOTE-1998/054.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 2001 года.

Голутвин И. А. и др.
Исследование радиационной стойкости
интегральной схемы АНОД

P13-2001-152

Исследована радиационная стойкость интегральной схемы АНОД — восьмиканального усилителя-дискриминатора. Схема предназначена для регистрации информации с проволочек камер с катодным считыванием передней мюонной станции ME1/1 установки эксперимента компактный мюонный соленоид (CMS). Эксперимент проведен на установке IRRAD2 на канале T8 ускорителя PS в ЦЕРН. Нейтроны преобладали в спектре частиц, и радиационное поле облучения соответствовало ожидаемому в условиях реального эксперимента на большом адронном коллайдере. Флюенс нейтронов составил $\Phi_{n \geq 100 \text{ кэВ}} = 6,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\Phi_{n \geq 20 \text{ МэВ}} = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а полная доза ионизационного облучения — 2,68 крад. Исследования показали незначительную деградацию параметров интегральной схемы.

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

Golutvin I. A. et al.
Investigation of the ANOD ASIC Radiation Hardness

P13-2001-152

Radiation hardness of the ANOD, an 8-channel amplifier-discriminator ASIC, for wire readout of the Cathode Strip Chambers of the ME1/1 forward muon station of the Compact Muon Solenoid experiment was investigated. The experiment was performed at the IRRAD2 facility at the T8 beam line of PS at CERN. Neutrons dominated in the particle spectrum and radiation field was similar to the expected one in real experimental conditions at the Large Hadron Collider. Neutron fluence was $\Phi_{n \geq 100 \text{ keV}} = 6.3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $\Phi_{n \geq 20 \text{ MeV}} = 6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and total ionization doze (TID) — 2.68 krad. Test results demonstrate an insignificant degradation of the ASIC parameters.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор А. Н. Шабашова. Макет Н. А. Киселевой

Подписано в печать 12.02.2002
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,35
Тираж 250. Заказ 53115. Цена 1 р. 35 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области