

M. Anokhin (SINP MSU). Microtopology of charge distribution in ionizing particles fields formed by cosmic rays on spacecrafts

МИКРОТОПОЛОГИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА В ПОЛЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗОВАННЫХ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Анохин М.В.^{1,3}, Галкин В.И.², Дитлов В.А.⁴, Дубов А.Е.³, Назиров Р.Р.⁶, Руткевич Б.П.³, Чабанов В.М.⁵, Чулков И.В.⁶.

1 – НИИЯФ МГУ, г. Москва, 2 — Физический факультет МГУ, г. Москва, 3 – СКБ КП ИКИ РАН, г. Таруса, 4 – ИТЭФ, г. Москва, 5 - ИТЭТ, г. Таруса, 6 – ИКИ РАН, г. Москва.

Экспериментально показано, что в сложном поле ионизирующих частиц, образуемом космическими лучами, наибольшие значения удельной поглощённой энергии, а, соответственно и плотность образованного при ионизации заряда, соответствуют местам остановок ионов. Моделированием показано, что в этих же местах отношение поглощения энергии ядерным континуумом к поглощению энергии ионизирующей частицы электронным континуумом среды линейно зависит от массы снаряда.

1. Мотивация работы.

Как показали прикладные космические эксперименты последних лет, использование существующих методик предсказания стойкости микроэлектроники приводят в ряде случаев к тысячекратным ошибкам в предсказании частоты сбоев (Таблица 1) [1].

Equipment	Part ID	SEU (times)		
		Predicted values		Measured values on orbit
		by heavy ion irradiation test	by Proton irradiation test	
OBC	32 bit CPU	3.9 / day	-	0.16 / day
	64M SDRAM	17 / day	-	0.02 / day
	4M SRAM	17 / day	-	3.4 / day
SIS	32bit CPU	0.23 / day	-	0.073 / day
	1M EEPROM	0 / day	-	0 / day
	256M SDRAM	4.5 / day	-	0.3 / day
ATTC	16bit DAC	0.8 / day	-	0 / day
	16bit ADC	1.0 / day	-	0 / day
PCDS	16bit CPU	-	2.0 / year	1.1 / year
CPT	1M SRAM	1.0 / day	2.8 / day	1.2 - 2.2 / day
	4M SRAM	3.4 / day	6.6 / day	2.2 - 8.3 / day
	128M SDRAM	2.6 / day	0.2 / day	0.33 - 0.38 / day
	256M SDRAM	3.6 / day	0.5 / day	0.5 - 0.9 / day

Таблица 1. Результат сравнительных испытаний микроэлектронных элементов на устойчивость к одиночным событиям, проведённых на пучке тяжёлых ионов, протонов и на круговой орбите, на высоте 1000 км. Репродукция из [1].

На это накладывається различное радиационное поведение критического параметра у разных образцов одной партии микросхем. В ряде случаев

разброс доз отказа может существенно превышать 100%. Один из многих примеров приведён на рис.1 [2].

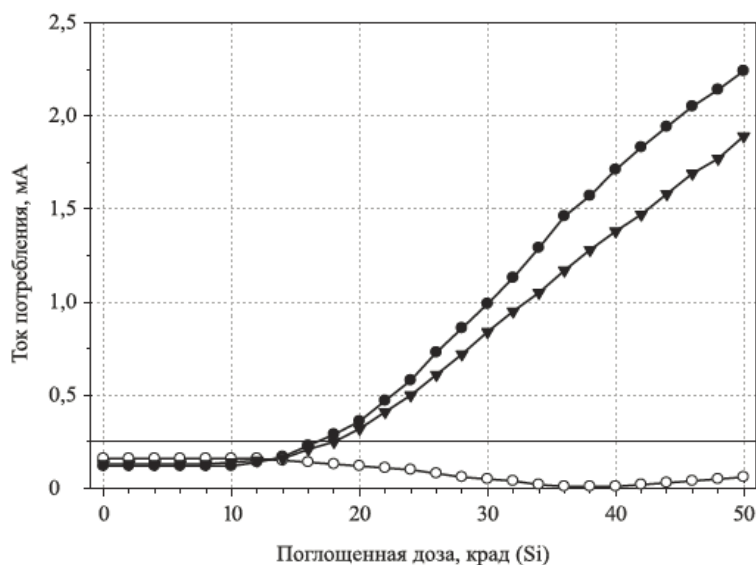


Рис. 1. Дозовые зависимости токов потребления образцов ИС SNJ54ABT125W (Texas instruments)

Эти и многие подобные обстоятельства заставляют усомниться в полноте физических представлений, положенных в основу нормативных документов, определяющих в настоящее время порядок разработки и изготовления электроники космического применения, как в нашем Отечестве, так и за рубежом.

2. Техника проведённых исследований.

Представляется, что, прежде всего, необходимо уточнить представление о поле ионизирующих частиц внутри космического аппарата.

В этом мы исходим из ряда аксиом:

- изменение состояния конденсированной среды происходит в объёме трека ионизирующей частицы;
- трек ионизирующей частицы – это объём, в котором происходит постоянное, метастабильное или транзиентное изменение состояния среды при прохождении через него заряженной частицы;
- трек может испускать электромагнитное, и фононное излучение, а также давать начало вторичным трекам;
- при наложении треков разных частиц, а также в электрическом и магнитном поле задача определения состояния среды решается особо;

А также имеем ввиду, одну теорему: изменение состояния вещества и практически все наблюдаемые радиационные эффекты определяются плотностью мощности в треке (силой осцилляторов, или плотностью мощности дозы в треке).

Доказательство теоремы весьма сложно. Только что вышедший из печати обзор теоретических работ [3] завершается фразой – «возможные механизмы

трекообразования всё ещё являются дискуссионными». Тем не менее к 2017 году основные представления о физике трека устоялись. Главное – это то, что стало понятно явление восстановления архитектуры кристалла после ряда фазовых переходов. Развилась нанотермодинамика Хилла для ансамбля небольшого числа частиц, внутренние степени свободы которого должны обладать статистической независимостью от степеней свободы окружающей среды. А также, сформулированы принципы синергии применительно к треку тяжёлой ионизирующей частицы.

Чтобы предсказать радиационную стойкость нанoeлектроники в многокомпонентном поле ионизирующих частиц, образованном космическими лучами, логично использовать [4] исходные микродозиметрические характеристики - удельную энергию z , частотную $f(z)$ и дозовую $d(z)$ плотности распределения удельной энергии в одиночном событии поглощения. Под удельной энергией z , [Гр], понимают стохастическую величину, равную частному от деления фактически поглощенной в микрообъеме энергии ε , [Дж], на массу μ , [кг], содержащегося в нем вещества, $z = \varepsilon / \mu$.

Экспериментально эти спектры измеряются нано- и микродозиметрами.

Правда, до сих пор отсутствует нормативный документ - аналог радиобиологическому РД 50-25645.217-90 для электроники космического применения.

Минуло более 100 лет [5] с тех пор, как первые наблюдения треков ионизирующих частиц в камере Вильсона подтвердили представление о том, что заряженные частицы инициируют изменения в физических и химических свойствах среды, и показали, что этим изменениям подвергаются лишь отдельные микрообъемы вещества, располагаемые вблизи траектории частицы.

Способы исследования треков совершенствовались непрерывно. Техника нашего эксперимента основана на композиции МДП матричных структур - ПЗС. Матрица ПЗС представляет собой подложку из полупроводникового материала, на которую наносятся слой диэлектрика и система электродов. При подаче на электроды напряжения под ними в полупроводнике образуются потенциальные ямы для неосновных носителей (обеднённые области). Потенциальные ямы под электродами разделены потенциальными барьерами. Совокупность потенциальных ям (ячеек) образует матрицу. Вводить заряд в ячейку можно термо- или фотогенерацией, а также за счёт свободных носителей заряда, образуемых заряженными частицами. При подаче на электроды последовательности тактовых импульсов напряжения происходит управляемое перемещение зарядов, накопившихся в потенциальных ямах, вдоль полупроводниковой подложки в выходной регистр и далее в выходное устройство. При прохождении частицы образовавшиеся носители диффузионно рассасываются и частично рекомбинируют. При подаче рабочего напряжения, появляются потенциальные ямы, в которые происходит сбор носителей.

Сбор носителей заряда осуществляется с глубины потенциальной ямы ~ 10 мкм (если частица проходит перпендикулярно матрице), а также за счёт диффузии с глубины $\sim 50 - 300$ мкм. В результате при прохождении релятивистской частицы с учётом диффузионного размытия на центральную ячейку приходится $\sim 1,5 \times 10^3$ носителей. Благодаря малой выходной ёмкости ПЗС ($\sim 0,1$ пФ) этот заряд создаёт на выходе сигнал ~ 1 мВ.

ПЗС обычно состоит из двух независимых секций - накопления и памяти. По приходе управляющего сигнала информация за время ~ 50 мкс выносится из чувствительной области в секцию памяти, откуда поэлементно считывается.

Шумы прибора включают шум предусилителя расположенного на кристалле Si, флуктуации фонового заряда, системный шум (нестабильность источника питания и т. д.). Суммарный среднеквадратичный шум ~ 100 носителей при $T = 300$ К (~ 50 С°) носителей при $T = 100$ К). Отношение сигнал/шум ~ 10 . Эффективность регистрации одиночной релятивистской частицы $> 98\%$.

В этой связи уникальную возможность для получения дифференциальных зарядовых спектров предоставляют имеющиеся в открытом доступе базы данных оптических изображений, полученных с помощью приборов БОКЗ (космический аппарат ЯМАЛ), LASCO (космический аппарат SOHO) и COR1, COR2 (космический аппарат STEREO) за более чем восемнадцатилетний период наблюдений.

Нахождение пространственных размеров трека, поглощаемой и излучаемой плотности мощности в нём а также спектр первичных частиц, образовавшихся в результате физических процессов взаимодействия заряженной частицы с веществом, и есть цель ряда исследований. Задача эта, к сожалению, весьма трудновыполнимая. Формирование и развитие трека происходят быстро и трудно поддаются экспериментальному наблюдению.

Так, на участке трека длиной 2 мкм распределение переданной среде энергии в объеме этого участка заканчивается за 75 фс. Процессы, происходящие за такие времена, недоступны прямому экспериментальному исследованию. Поэтому наша работа основана на сочетании техники многовоксельных матриц с теоретическими исследованиями и привлечением методов математического моделирования. При планировании такого вычислительного эксперимента и формировании математической модели исследуемого процесса прохождения заряженных частиц через вещество целесообразно иметь в виду, что взаимодействия заряженных частиц с атомами имеют важную специфику, связанную с тем, что с большой вероятностью преобладают малые потери энергии в неупругих процессах, а андикатриса рассеяния существенно анизотропна. В этих условиях существующий математический аппарат теории переноса ионизирующих частиц используется с серьёзными приближениями. Здесь мы сталкиваемся с фактом, когда вычислительные проблемы требуют не всегда оправданных упрощений исходных физических моделей.

Используя программный продукт GEANT4, мы провели статистическое моделирование остановки протона энергией 10 МэВ в кремниевой квадратной матрице, собранной из одного слоя вокселей размером 16 x 16 x 60 мкм. Протон входит параллельно диагонали верхних граней вокселей, составляющих матрицу, что позволяет получить (рисунок 2) спектр объёмной плотности поглотённой в вокселях матрицы энергии.

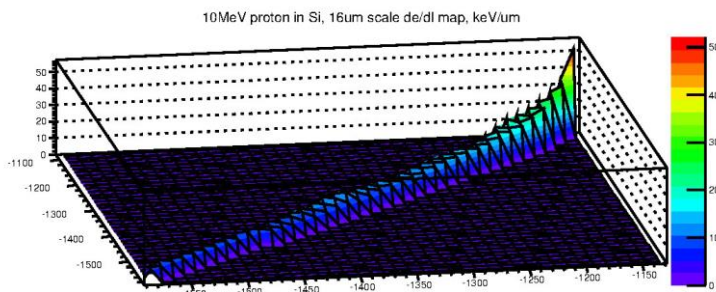


Рис.2. Статистическое моделирование остановки протона энергией 10 МэВ в кремниевой квадратной матрице, собранной из одного слоя вокселей размером 16 x 16 x 60 мкм.

Такое моделирование интересно сопоставить с результатами, полученными с матрицы ПЗС «Лев» находящейся в поле протонного потока (Аванесов Г.А., Воронков С. В.). Из полученных кадров можно выделить события, отображающие остановку протонов в чувствительной области вокселей. .

3D отображение величины электрического заряда вокселях матрицы «Лев» при остановке протона представлен на Рис.3.

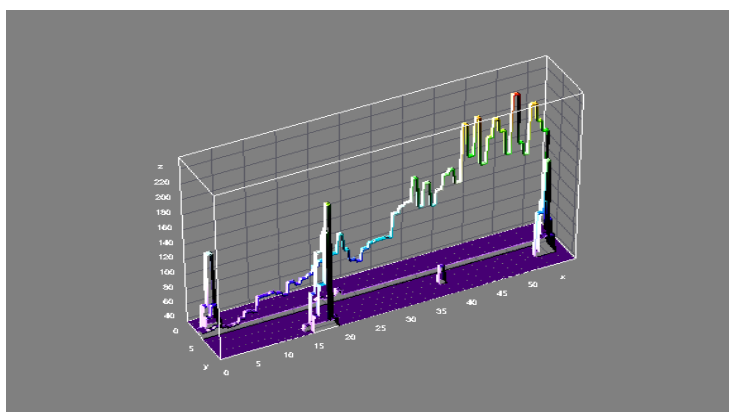


Рис.3. 3D отображение величины электрического заряда вокселях матрицы «Лев» при остановке протона в чувствительной области.

3. Методика измерений и обработки данных.

Для проведения исследования спектров плотности удельной энергии на космических аппаратах мы использовали ПЗС матрицы прибора LASCO (SOHO). На рисунке 4 приведена часть кадра размером $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$ (Kodak KAI-0340 CCD) во время солнечной вспышки. Оптический канал закрыт полностью крышкой. Слева показано 2D отображение распределения электрического заряда, накопленного вокселями матрицы за 18 секунд. Наш алгоритм предварительной выборки с использованием теории распознавания образов выделяет на этой площади для дальнейшего анализа около 5400 объектов, созданных ионизирующими частицами СКЛ из которых при превышении уровня дискриминации в 1 фКл 85% событий идентифицируется как пик Брэгга.

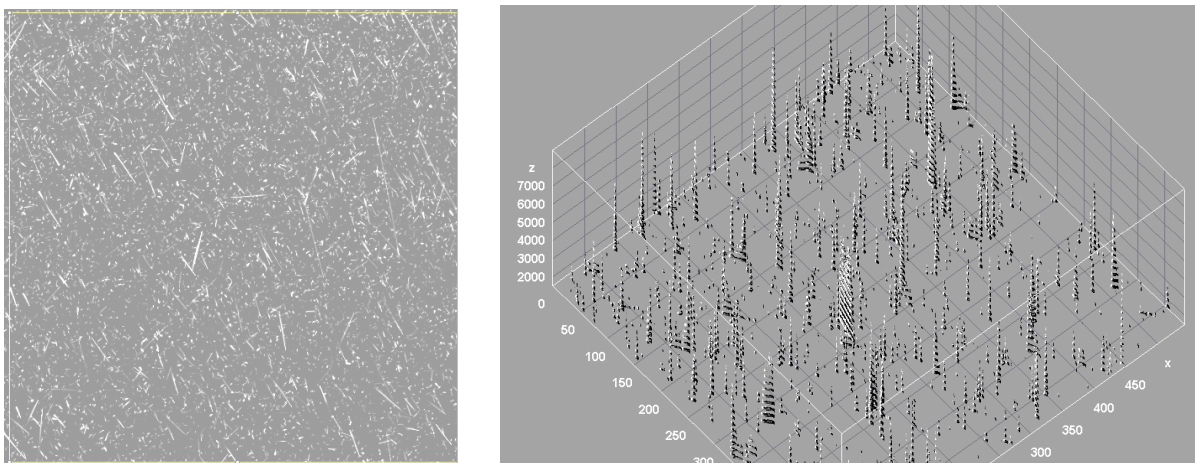


Рис.4. Часть кадра размером $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$ (Kodak KAI-0340 CCD) во время солнечной вспышки. Оптический канал закрыт полностью крышкой. Слева показано 2D отображение распределения электрического заряда, накопленного вокселями матрицы за 18 секунд. Справа этот же участок кадра, обработанный макросом «gradient» (ImageJ, Int. 3D, Surf. Pl). По оси z отложена величина электрического заряда. Между эквипотенциальными (эквизарядовыми) уровнями шаг $\cong 0,1 \text{ фКл}$.

Справа этот же участок кадра обработанный макросом «gradient» (ImageJ, Int. 3D, Surf. Pl). По оси z отложена величина электрического заряда. Между эквипотенциальными (эквизарядовыми) уровнями шаг - $0,1 \text{ фКл}$.

Разработанный нами программный инструмент предназначен для идентификации и анализа одиночных событий, происходящих под действием внешних радиационных факторов в структуре матричных оптически сенсоров и регистрируемых по характерным трековым изображениям на растровых кадрах видеосъёмки. Поиск интересных объектов осуществляется по задаваемым пользователем критериям в виде совокупности диапазонов яркости некоторого количества хронологически либо геометрически обособленных пикселей. Каждая такая совокупность является профилем идентификации, который формируется пользователем в диалоговом режиме и сохраняется под назначенным именем для возможности повторного поиска.

Используются два типа профилей: кинетический и геометрический. К первому типу относятся профили, включающие диапазоны яркостей одного и того же пикселя для некоторого количества последовательно идущих смежных кадров. Особое условие, определяемое общим свойством всех регистрируемых событий, - превышение яркости в центральном кадре над яркостью в соседних кадрах.

4. Обсуждение результатов.

Смоделировав эту матрицу в виде слоёв кремния, при помощи программы SRIM мы отобрали на рисунке 5 область пика Брэгга для ионов - снарядов, проходящих через воксели параллельно плоскости матрицы и остановившихся в ней.

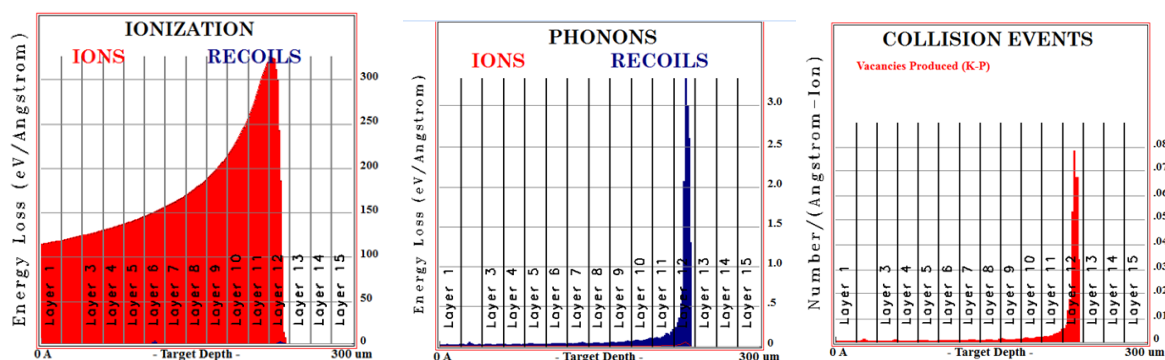


Рис.5. Результаты моделирования остановки иона кремния в ПЗС матрице, проведённого с помощью программы SRIM.

Толщина слоя кремния при моделировании составляет 20 мкм, что соответствует размеру грани вокселя ПЗС,

Сравнивая рисунки 5 можно отметить, по крайней мере качественно, что топология распределения заряда, ядер отдачи и вакансий моделирования и эксперимента сходны.

Это прямо указывает на то, что удельная энергия z , частотная $f(z)$ и дозовая $d(z)$ плотности распределения удельной энергии в одиночном событии поглощения по крайней мере двухкомпонентны, что соответствует общему современному представлению о поглощении энергии ионизирующей частицы электронным континуумом среды и ядерным континуумом.

Поглощение энергии электронным континуумом среды, то есть образование электрон-дырочных пар, определяет электродинамику полупроводникового прибора. В то же время считается, что радиационные повреждения в объеме этих материалов зависят в основном от энергии, переданной ядрам отдачи.

Деградация свойств полупроводниковых микроэлементов обусловлена специфическими для конкретной конфигурации чувствительного объёма дефектами электронной структуры. Последние не обязательно непосредственно связаны с дефектами смещения, а скорее с теми дефектами,

которые возникают в результате их эволюции, например, бивакансиями или комплексами из двух вакансий и кислорода в кремнии. Установление соответствия между дефектами электронной структуры и порождающими их физическими процессами представляет сложную задачу, которая пока окончательно не решена. Поэтому иметь представление о спектрах дозовой $d(z)$ плотности распределения удельной энергии в одиночных событиях, в электронном и ядерном континууме, а также кросскорреляции ξ этих составляющих поглощения в значительной степени актуально. Особенно это интересно для зоны треков в пике Брэгга, поскольку в этом месте максимальная плотность мощности, поглощаемая кремнием.

Результаты нашего моделирования для снарядов различной массы представлены на рисунке 6.

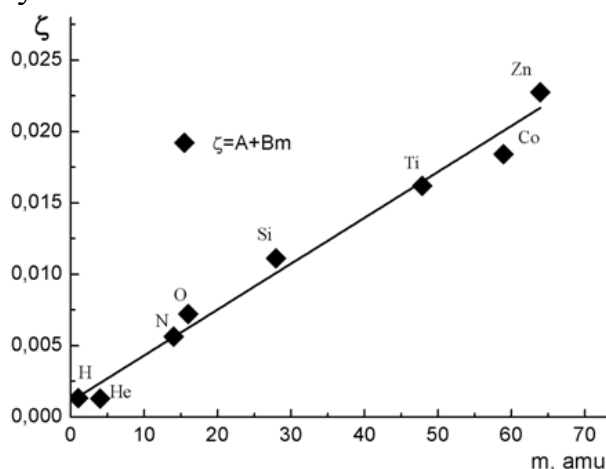


Рис.6. Отношение дозовой плотности поглощения энергии в ядерном континууме кремния к дозовой плотности поглощения в электронном континууме в зависимости от массы снаряда в области пика Брэгга, полученное с помощью программы SRIM.

Отношение дозовой плотности поглощения в ядерном континууме кремния к дозовой плотности поглощения в электронном континууме в зависимости от массы снаряда хорошо аппроксимируется прямой линией. Это удобно, поскольку, измеряя электрический заряд в зоне максимального значения поглощённой плотности мощности на треке ионизирующей частицы при помощи матричного микродозиметра (например, ПЗС матрицы) можно судить о плотности мощности поглощённой ядерным континуумом чувствительного микрообъёма.

Таким образом, это есть весомый аргумент в пользу того, что электрический заряд, измеряемый локально, детекторами достаточно малого размера может быть в значительной степени универсальным параметром, прямо связанным с основными поражающими свойствами поля ионизирующих частиц, в данном случае с компонентой дозовой удельной энергии, переданной ядерному континууму. При этом, $\xi = A + Bm$, где m – масса иона в атомных единицах. $A \approx 0$; $B \approx 3 \times 10^{-4}$.

Таким образом, представляется целесообразным расширить понятие **экспозиционная дозы** как отношение суммарного заряда dQ созданного в элементарном объеме к его массе dm ($\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$) для ионов (снаряд) и

конденсированной среды (в частности кремний). До настоящего времени экспозиционная доза используется только для фотонного поля в воздухе.

Библиография.

1. Space Environment Reliability Verification Integrated System **Servis-1, 2**.
2. Proton Test Guideline Development - Lessons Learned Prepared by: Stephen Buchner, Paul Marshall, Scott Kniffin and Ken LaBel NASA/Goddard Space Flight Center For: NASA Electronic Parts and Packaging (NEPP) Program Electronics Radiation Characterization (ERC) Project And Defense Threat Reduction Agency Date: 8/22/02
3. Ф.Ф. Комаров. Нано- и микроstructuring твердых тел быстрыми тяжёлыми ионами УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК, май 2017г., том 187, N5 стр. 466-504, ссылок - 460.
4. РД 50-25645.217-90.
5. H. Geiger and E. Marsden, Proc. Roy. Soc, 82,495 (1909).