

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТА ДЧС-НИСА

*О. Васильев^{а, 1}, Д. Карманов^{а, 2}, И. Ковалев^{а, 3}, И. Кудряшов^{а, 4},
А. Курганов^{а, 5}, А. Панов^{а, 6}, Д. Подорожный^{а, 7}, А. Сливин^{б, 8},
Е. Сыресин^{б, 9}, А. Турундаевский^{а, 10}, Г. Филатов^{б, 11}*

^а Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В современных реалиях остро стоит задача обеспечения радиационной стойкости электронной комплектующей базы космических аппаратов. Для решения этой задачи необходимо более подробное изучение воздействия радиации на микросхемы. В статье представлен проект ДЧС-НИСА для решения названных задач и предварительные результаты его моделирования, подтверждающие работоспособность основополагающих методик.

Today the task of ensuring the radiation resistance of ICs for space exploration is very important. To solve this problem, a detailed examination of radiation effects on electronics is required. The DPS-NICA project, aimed to solve these problems, is presented, as well as preliminary simulation results which confirm the operability of this project's fundamental methodics.

PACS: 29.90+г; 29.40.-п

ВВЕДЕНИЕ

С развитием космической отрасли и ростом уровня решаемых как промышленных, так и научных (в том числе фундаментального значения) задач в околоземном и межпланетном пространстве существенно повышаются и требования к электронике: идет

¹E-mail: oav@rsx.sinp.msu.ru

²E-mail: karmanov68@mail.ru

³E-mail: im.kovalev@physics.msu.ru

⁴E-mail: ilya.kudryashov.85@gmail.com

⁵E-mail: aa.kurganov@rsx.sinp.msu.ru

⁶E-mail: panov@dec1.sinp.msu.ru

⁷E-mail: dmpo@bk.ru

⁸E-mail: slivin@jinr.ru

⁹E-mail: esyresin@jinr.ru

¹⁰E-mail: ant@eas.sinp.msu.ru

¹¹E-mail: filatov@jinr.ru

ее значительное усложнение и миниатюризация. Развитие электроники ставит задачу обеспечения ее радиационной стойкости, требования к которой также растут из-за необходимости увеличения надежности и рабочего срока космической аппаратуры. Отдельной задачей становится подробное исследование влияния радиации на специализированные большие интегральные схемы (СБИС) и обеспечение максимальной радиационной стойкости при минимальной пассивной защите и резервировании.

Воздействие радиации на СБИС можно разделить на два класса:

- накопленная доза ионизации — Total Ionizing Dose (TID);
- одиночные случайные эффекты — Single Event Effects (SEE).

TID со временем приводят к постепенной деградации БИС и ее характеристик (увеличение токов утечки, потребляемой мощности, существенное влияние на аналоговые тракты и дрейф опорных напряжений). Дозовые эффекты на сегодняшний момент достаточно хорошо изучены в экспериментах на протонных и электронных ускорителях.

SEE вызываются непредсказуемыми одиночными воздействиями тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), не вносящих большой вклад в дозовые эффекты ввиду их редкости. Данные эффекты определяются линейной удельной потерей энергии, пропорциональной квадрату заряда частицы и обратно пропорциональной ее энергии. SEE могут быть вызваны как тяжелыми ядрами — группами Fe галактических космических лучей (ГКЛ), так и более легкими ядрами с низкой энергией из состава ГКЛ, аномальной компоненты космических лучей и солнечных космических лучей. Влияние ядер с зарядом выше железа возможно, но маловероятно ввиду резкого падения плотности потока ядер с ростом Z . Несмотря на низкий вклад в дозовые эффекты, случайное попадание ТЗЧ в чувствительный макрообъем БИС может вызвать существенную нестабильность или полный выход из строя компонента электроники. Экспериментального материала для детального описания SEE недостаточно.

ПРОЕКТ ДЧС-NICA

Проект «Детекторная часть станции для исследований и облучений перспективных изделий полупроводниковой микро- и нанoeлектроники пучками высокой энергии» (сокращенно ДЧС-NICA) направлен на расширение экспериментального материала в области воздействия SEE для создания более точных моделей и разработку методики для точно локализованной проверки микросхем на радиационную стойкость. В качестве источника частиц предполагается использование выводного пучка ускорительного комплекса NICA, предоставляющего возможность имитации воздействия всех типов космических лучей.

В рамках данного проекта производится разработка специализированного детектора — ДЧС — для массового тестирования применяемых в настоящее время СБИС. В задачи детектора входят:

- 1) прецизионная локализация трека частицы в микросхеме и энерговыделения в ней;
- 2) точная локализация наиболее уязвимых областей микросхемы, требующая точного позиционирования микросхемы в установке, что проблематично при исследовании корпусных микросхем из-за отсутствия требований на точность установки кри-

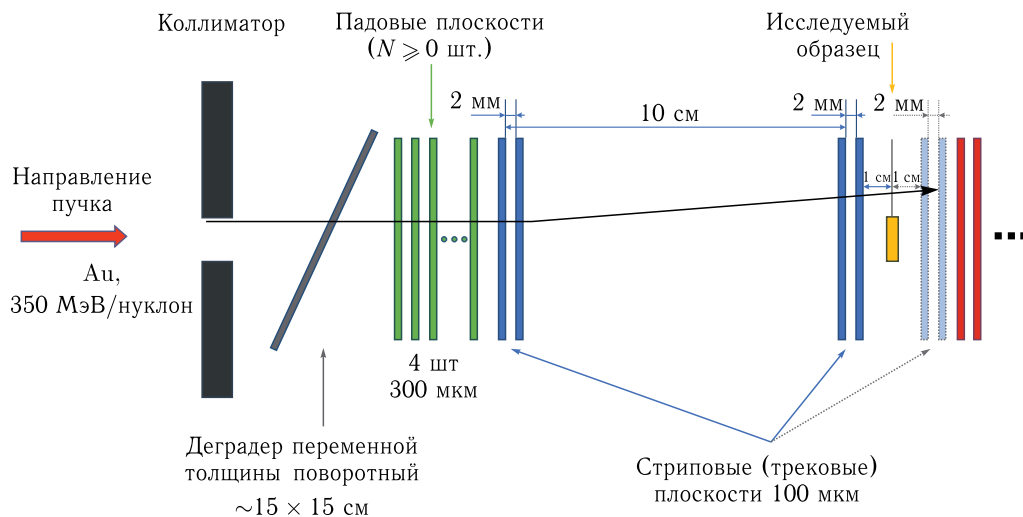


Рис. 1. Схема установки

сталла в корпусе. Задачей ДЧС становится и определение профиля исследуемого образца с локализацией кристалла БИС.

В данной статье авторами представлены предварительные результаты моделирования предполагаемой конструкции ДЧС (рис. 1).

МОДЕЛЬ

Математическая модель установки ДЧС реализована на основе программного пакета FLUKA [1,2]. Схема установки показана на рис. 1.

В качестве входного пучка ядер в моделировании использовались ядра ^{197}Au при энергии 350 МэВ/нуклон. Пучок имел квадратное сечение 3×3 см с равномерным распределением ядер по площади сечения. Между детекторами установки и входной диафрагмой располагается деградер из вольфрама. На схеме он изображен в виде пластинки фиксированной толщины, для которой имеется возможность менять ее угол к пучку для изменения толщины вещества, проходимой пучком ядер, однако в моделировании использовались слои вольфрама разной толщины, перпендикулярные пучку. Ввиду параллельности пучка главной оси системы влияние этого различия не сказывается на результатах моделирования. Деградер в реальной установке необходим для уменьшения энергии ядер с входной в 350 МэВ/нуклон. В типичном моделировании деградер толщиной 1,1 мм снижает энергию ядер до 215 МэВ/нуклон (в разных сеансах моделирования эти параметры слабо, но различаются).

За деградером следуют четыре кремниевых падовых детектора толщиной 300 мкм. Следом за ними идет пара кремниевых стриповых детекторов толщиной также 300 мкм с шагом стрипа 100 мкм, расположение стрипов детекторов в паре взаимно перпендикулярное, вдоль координатных осей X и Y . Все существенные продольные размеры показаны на рис. 1.

После продольного промежутка в 10 см располагается еще пара стриповых детекторов, точно такая же, как первая пара. В следующем за ней промежутке длиной 2 см перпендикулярно оси прибора располагается исследуемая микросхема, и за ней располагается еще пара стриповых детекторов толщиной 300 мкм. Наличие здесь стриповых детекторов позволяет использовать разные варианты реконструкции координат ядер при прохождении через микросхему, но в основном варианте моделирования отдельные стрипы этих детекторов не трактовались отдельно, но суммарный сигнал стрипов одного стрипового детектора имитировал сигнал одного падового детектора, поэтому с логической точки зрения детекторы, располагающиеся за микросхемой, — это простые падовые детекторы, такие же, как на входе в установку. В реальной установке далее предполагается разместить еще несколько падовых детекторов для исследования дополнительной научной задачи по разделению изотопов (показаны красным на рис. 1, с последующим многоточием), но в обсуждаемом варианте модели они не были реализованы, поскольку для решения основных задач ДЧС их наличие не критично, и в данной статье они обсуждаться не будут.

РЕКОНСТРУКЦИЯ КООРДИНАТ ЯДЕР ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМЫ

Исследованы два разных алгоритма реконструкции координат ядра при прохождении микросхемы. В обоих алгоритмах процесс реконструкции начинается с предварительной обработки данных, заключающейся в локализации точек прохождения первой и второй пары стриповых детекторов по каждой из координат, что легко определяется по номерам сработавших стрипов. Далее алгоритмы устроены по-разному.

В первом варианте траектория между первой и второй парами стриповых детекторов экстраполируется по прямой до плоскости микросхемы (под плоскостью микросхемы, как правило, понималась геометрическая середина толщины микросхемы, включая корпус, вдоль оси прибора). Такой алгоритм приводит к ошибке определения координат, которая связана с упругим рассеянием ядра на некоторый угол при прохождении плоскостей последней пары стриповых детекторов.

Во втором варианте пара детекторов, расположенная за микросхемой, трактовалась как пара стриповых детекторов, что позволяло определить координаты ядра при прохождении этой пары. Тогда координата ядра при прохождении плоскости микросхемы определялась путем интерполяции координат по паре стриповых детекторов перед микросхемой и после микросхемы. Однако, так как при прохождении ядра через микросхему его энергия уже весьма мала, ядро испытывает в теле микросхемы упругое рассеяние на большой угол, приводящее к сильному излому траектории. Поэтому интерполяция координат прямой линией между парами детекторов до и после микросхемы приводит к большой ошибке локализации трека в микросхеме, так как траектория в общем случае сильно отличается от прямой. Из-за названных причин второй алгоритм не показал значительных преимуществ, и в основной части моделирования (см. ниже) был использован первый алгоритм. Дополнительным преимуществом первого алгоритма является более простая схема прибора, так как в этом случае стриповые детекторы за микросхемой не нужны, достаточно иметь простые падовые детекторы для определения энерговыделения при прохождении ядра через них.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как уже было сказано выше, ДЧС призван решать задачи двух сортов. Во-первых, для каждого события прохождения ядра через микросхему должна быть обеспечена возможность реконструировать энерговыделение данного ядра при прохождении объема микросхемы. Решение этой задачи тривиально: по энерговыделениям в различных детекторах прибора можно восстановить кривую Брэгга $dE/dX(E)$, а так как энерговыделения определяются как до микросхемы, так и после нее, то энерговыделение в самой микросхеме легко вычисляется путем интерполяции кривой Брэгга. Ожидается, что точность такой реконструкции будет на уровне единиц процентов. Эта задача выглядит относительно простой, и она не исследовалась в настоящей работе.

Во-вторых, должна иметься возможность реконструкции внутренней структуры микросхемы в поперечной плоскости пучка для привязки положения кристалла к системе координат детектора. Идея методики такой реконструкции, ниже называемой энергетической томографией, заключается в следующем.

Оставленная частицей энергия в микросхеме зависит, по большей части, только от того, какая толщина вещества была ей пройдена и какого рода. От этого будет зависеть и ее энергия при прохождении падовых детекторов за микросхемой, а при строго заданной начальной энергии это будет основным определяющим фактором. Поскольку энерговыделение частицы зависит от ее энергии, то его в названных детекторах можно соотнести с внутренней структурой микросхемы. Вместе с реконструированными координатами прохождения ядра через микросхему картина энерговыделений дает определенный сорт изображения внутренней структуры микросхемы и, в конечном счете, для каждого ядра с определенной точностью позволит понять, через какой элемент микросхемы прошло это ядро.

В определении работоспособности методики энергетической томографии возникают два основных вопроса, ответы на которые можно дать моделированием:

- 1) действительно ли энерговыделение в детекторах за микросхемой позволяет различить детали внутреннего устройства микросхемы с учетом различных физических флуктуаций;
- 2) какое пространственное разрешение можно обеспечить такой методикой при ее работоспособности.

Получение ответа на эти вопросы являлось основной целью проведенного моделирования, что рассмотрено далее.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ НА ПРОСВЕТ МИКРОСХЕМ С ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ — РАЗРЕШЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ

В моделировании использовались несколько условных моделей микросхем. Здесь будут представлены результаты для двух основных типов: микросхемы с воздушными пустотами внутри и монолитной микросхемы (чип залит в пластмассовый корпус). Задача разрешения внутренней структуры для микросхем с пустотами внутри выглядит более простой, чем для монолитной микросхемы, так как в первом случае ожидаемый контраст изображения выше.

Микросхема с воздушными пустотами внутри. Схема модели микросхемы с воздушными пустотами внутри ясна из рис. 2. Полная толщина керамического корпуса составляет 2 мм (показана на схеме справа), толщина крышки из никеля 0,1 мм, остальные размеры воспроизведены на схеме пропорционально.

Рис. 3 дает общее представление о том, как работает энергетическая томография. На рисунке показаны трехмерные диаграммы энерговыделений ядра золота в первой

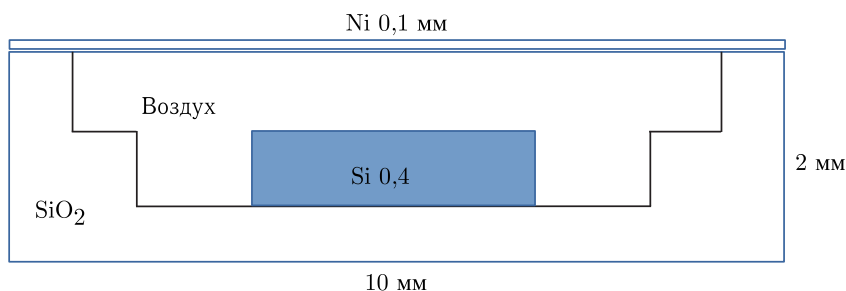


Рис. 2. Модель микросхемы с пустотами

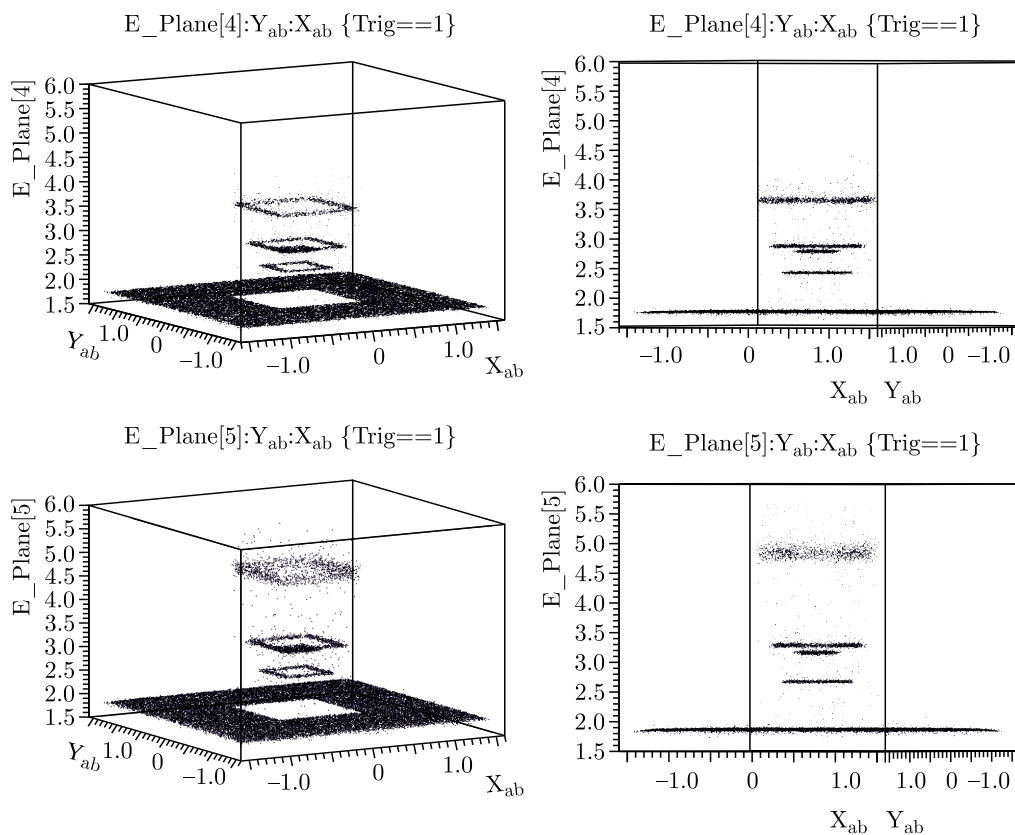


Рис. 3. Энергетическая томография модели микросхемы с воздушными пустотами внутри

(две верхние диаграммы) и во второй падовых плоскостях после микросхемы. Для каждого пада приведены два вида одной и той же диаграммы. По осям X и Y (в см) отложены реконструированные координаты ядра при прохождении средней плоскости микросхемы. По оси Z отложено энерговыделение в ГэВ. Хорошо видно, как энерговыделение разрешает основные структуры внутри микросхемы. На виде сбоку (графики справа) ясно, что все структуры действительно разрешаются очень хорошо.

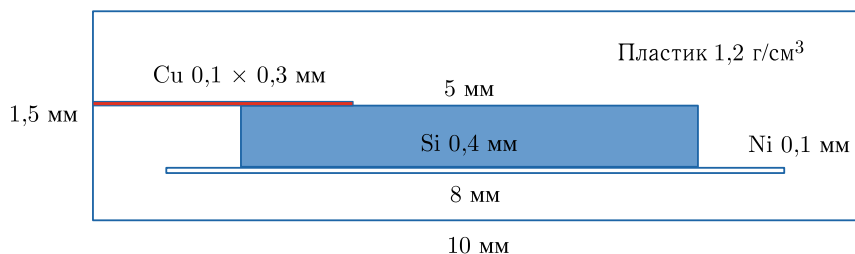


Рис. 4. Модель монолитной микросхемы

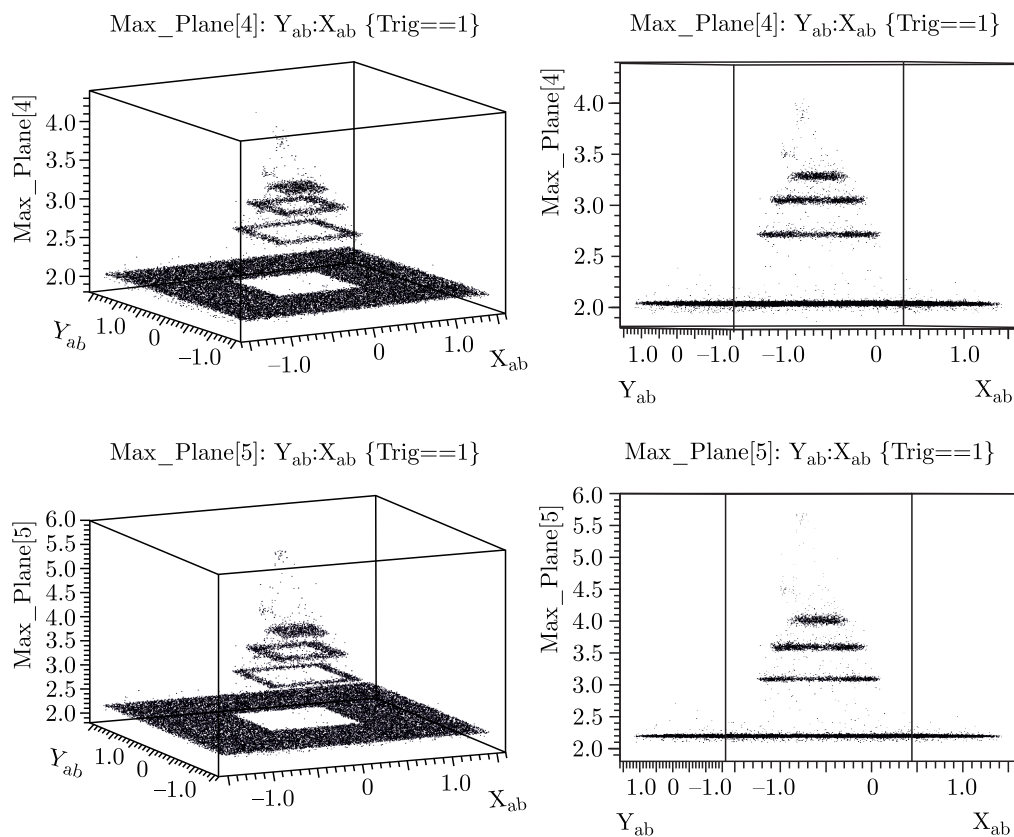


Рис. 5. Энергетическая томография модели монолитной микросхемы

Чем больше энерговыделение, тем с меньшей энергией ядро пришло к паду, следовательно, тем большие энергетические потери оно претерпело внутри микросхемы и тем большую толщю вещества частица прошла. На диаграмме, относящейся ко второму паду от микросхемы, заметно, что энергетический слой, соответствующий наибольшему энерговыделению (полная толщина керамики плюс никелевая крышка вблизи края микросхемы), размыт заметно сильнее, чем аналогичная структура на первом паде после микросхемы. Это связано с тем, что во втором паде энергия оказывается столь малой, что кривая dE/dX близка к брэгговскому пику, где флуктуации энерговыделения велики.

Важно отметить, что диаграммы, представленные на рис. 3, соответствуют сеансу моделирования в 40 тыс. событий, что близко к количеству ядер в одном сбросе ускорителя. Легко может быть получена значительно более высокая статистика, что обеспечит и более высокое качество изображения. И наоборот, для каждого индивидуального ядра по его энерговыделению можно определить, через какую часть микросхемы оно прошло.

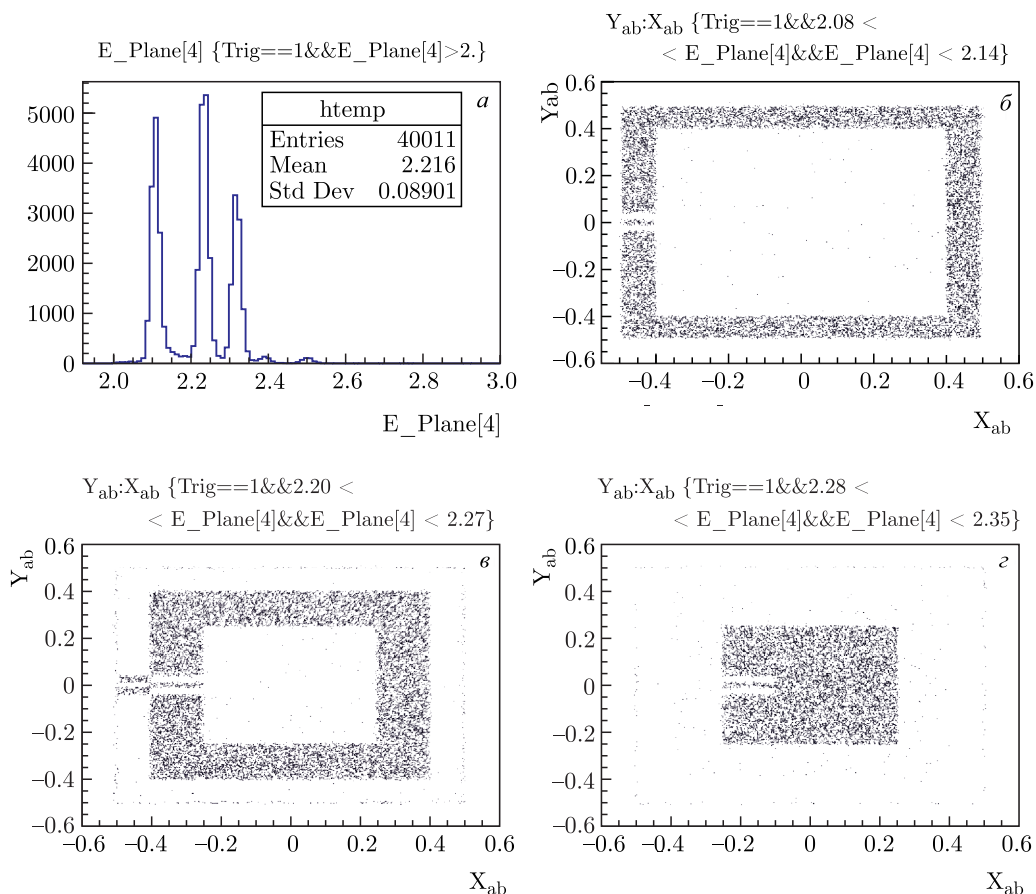


Рис. 6. Энергетическая томография монолитной микросхемы в послойном изображении

Монолитная микросхема. Схема модели монолитной микросхемы ясна из рис. 4. Полная толщина пластмассового корпуса составляет 1,5 мм (показана на схеме слева). Другие размеры (в мм) также показаны на схеме. Химический состав и плотность пластика соответствуют стандартной эпоксидной смоле. Дополнительной деталью, реализованной в модели, являются два медных подводящих проводника с сечением 100×300 мкм (в соответствии с параметрами реальных элементов этого же типа).

Рис. 5 дает общее представление о работоспособности методики энергетической томографии в случае монолитной микросхемы и подобен рис. 3. Видно, что основные структуры микросхемы разрешаются и в этом случае. Диаграммам рис. 5 также соответствует объем моделирования в 40 тыс. событий.

Размытые облака точек, содержащие небольшое число событий, в верхней части диаграмм — это сигнал тонких медных проводников. Его можно разглядеть значительно лучше, если увеличить статистику. Результаты моделирования с увеличенной статистикой до 400 тыс. сгенерированных событий (т. е. примерно 10 сбросов ускорителя) представлены на рис. 6. Одновременно на нем представлен другой, послойный, способ представления томограмм. На рис. 6, а показано распределение энергосодержаний ядра золота в первой после микросхемы падовой плоскости. Каждый отдельный пик этого распределения соответствует определенной комбинации материалов в вертикальной колонке вещества микросхемы. Видно, что отдельные пики очень хорошо разрешаются. На трех двумерных диаграммах показаны распределения реконструированных координат ядра золота на уровне средней плоскости микросхемы. Полученные картинки представляют собой двумерные карты распределения вещества микросхемы, соответствующие различным составам вертикальных колонок вещества. На картах хорошо видны, в том числе, упомянутые выше медные проводники.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Последний вопрос, который следует рассмотреть, — это пространственное разрешение метода энергетической томографии. Мы рассмотрим его на примере монолитной микросхемы предыдущего раздела. Методика определения пространственного разрешения проиллюстрирована на рис. 7. Рис. 7, а является проекцией рис. 6, б на гистограмму, ориентированную вдоль оси X . На рис. 7, б показана часть, соответствующая правому краю микросхемы. Степень резкости ступеньки на гистограмме, передающей край микросхемы, позволяет узнать количественную меру пространственного разрешения томографии. Для перехода к привычным терминам, изображающим различные разрешения приборов в виде колоколообразных функций, нужно найти производную этой сглаженной ступеньки. Результат соответствующего вычисления показан на рис. 7, в.

Полученная асимметричная форма пика затрудняет его описание в терминах гауссовой функции. Разрешение, определенное как полуширина пика на половине высоты, составляет около 40 мкм. Это и есть ожидаемое пространственное разрешение метода энергетической томографии. Оно определяется, главным образом, упругим рассеянием

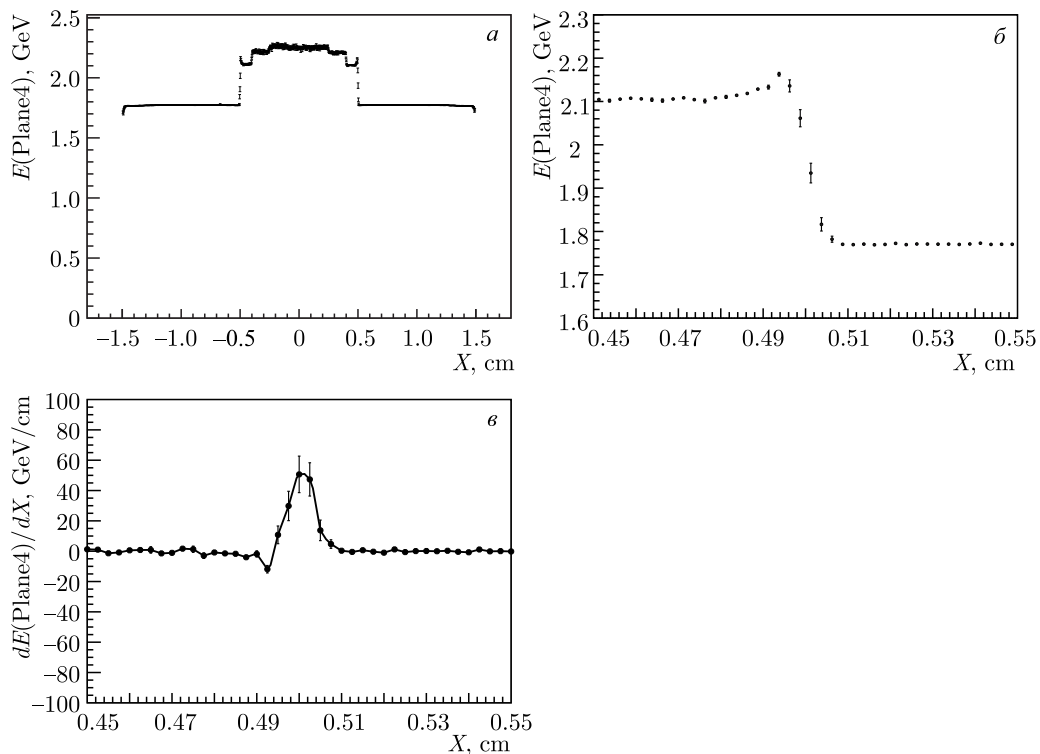


Рис. 7. Иллюстрация методики определения пространственного разрешения энергетической томографии

ядер в двойном слое стриповых детекторов перед микросхемой и будет иметь некоторую зависимость от деталей проведения эксперимента (в основном от энергии ядер при преодолении этих детекторов). Но в любом случае результат будет не слишком сильно отличаться от значения, полученного выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект ДЧС-NICA предназначен для расширения экспериментального материала в области исследований радиационного воздействия на микроэлектронику и точной проверки микросхем на радиационную стойкость. В данной статье представлены результаты моделирования детекторной части системы (ДЧС) применительно к одной из задач, которую призван решать детектор, — привязке кристалла микросхемы к координатной системе и определению ее внутренней структуры.

В результате моделирования выяснено, что предлагаемая методика энергетической томографии позволяет с достаточной точностью решить задачу даже при малой статистике, а при значительно больших статистиках, ожидаемых на ускорителе, контраст томограмм будет отличный. Помимо этого было определено пространственное разрешение методики в моделировании, которое составило 40 мкм.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Уникальный идентификатор соглашения — RFMEFI60719X0326.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ferrari A., Sala P.R., Fassó A., Ranft J.* FLUKA: A Multi-Particle Transport Code. CERN-2005-10. 2005; INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
2. *Böhlen T.T., Cerutti F., Chin M.P.W., Fassó A., Ferrari A., Ortega P.G., Mairani A., Sala P.R., Smirnov G., Vlachoudis V.* The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications // Nucl. Data Sheets. 2014. V.120. P.211–214.

Получено 13 июня 2020 г.