

5. ПАКЕТ IntelliSuite

Разработчиком программного комплекса IntelliSuite является компания IntelliSense Software Corporation (США), основанная в 1991 году.

Комплекс IntelliSuite содержит широкий набор инструментальных средств для разработки МЭМС и НЭМС широкого назначения. Он позволяет проводить проектирование термомеханических систем, пьезодатчиков, электромагнитных и рентгеновских преобразователей, био-МЭМС и микроканальных устройств.

Спектр задач, решаемых комплексом, охватывает основные этапы проектирования и подготовки производства устройств МЭМС и НЭМС – проектирование от создания моделей устройств и процессов, применяемых

на различных стадиях промышленного производства, их исследования и оптимизации до разработки технологического маршрута изготовления.

Комплекс IntelliSuite является одной из первых разработок программного обеспечения для проектирования МЭМС широкого назначения. Программные продукты IntelliSuite, выпущенные в 90 годах XX века, относятся к первым подобным разработкам в области МЭМС: 1993 г. – выпущены первые программные продукты для МЭМС (MEMaterial); 1995 г. – первый интегрированный инструментарий САПР (Intellisuite v1); 1997 г. – первые программы для моделирования анизотропного травления; 1999 г. – первый инструментарий MFMS (Micro Fluidic Molecular Systems) для моделирования операций с жидкостями на микроуровне со встроенной в микроканал автономной системой управления потоком.

В 2000 году компания Corning приобрела IntelliSense Software, изменив название на Corning IntelliSense. После основания в 2006 году IntelliSense China компания в 2009–2010 годах продолжает активно развивать сотрудничество с ведущими производителями МЭМС и осуществляет управление собственным экспериментальным производством.

5.1. Концепция проектирования в пакете IntelliSuite

Концепция проектирования в пакете IntelliSuite базируется на объединении нисходящего и восходящего процессов проектирования (рис. 5.1, 5.2).

В первом случае при нисходящем проектировании разработка (синтез устройства) ведется на основе схемного описания устройства. При этом результатом процесса проектирования является набор масок (фотошаблонов) для изготовления изделия, описание технологического процесса, трехмерная геометрическая модель. Данный подход оценивается как экономичный по затратам времени, но недостаточно эффективный с точки зрения точности результатов.

При нисходящем проектировании разработка основывается на трехмерной геометрической модели. В процессе проектирования формируется набор масок (шаблонов) и технологический маршрут для изготовления устройства.

Исследование поведения создаваемого устройства выполняется с помощью междисциплинарного физического анализа или упрощенных функциональных моделей. Данный подход оценивается как требующий большего времени, но обеспечивающий точность анализа.

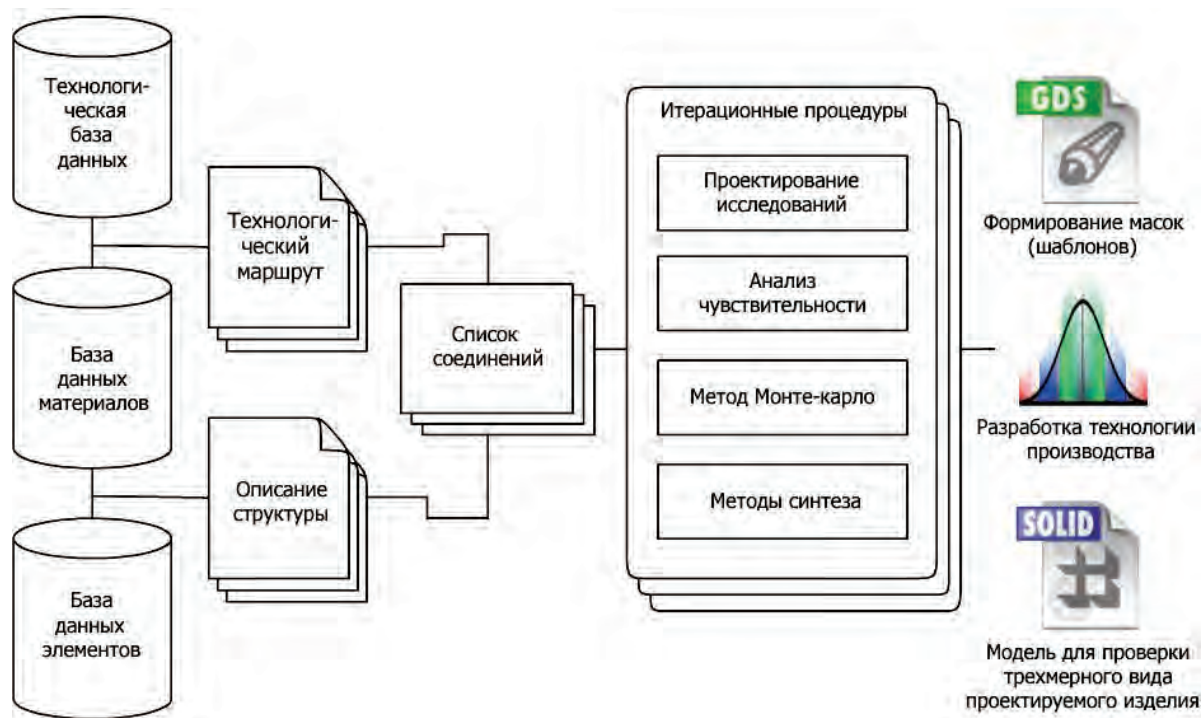


Рис. 5.1. Нисходящее проектирование на основе описания схемы в пакете IntelliSuite

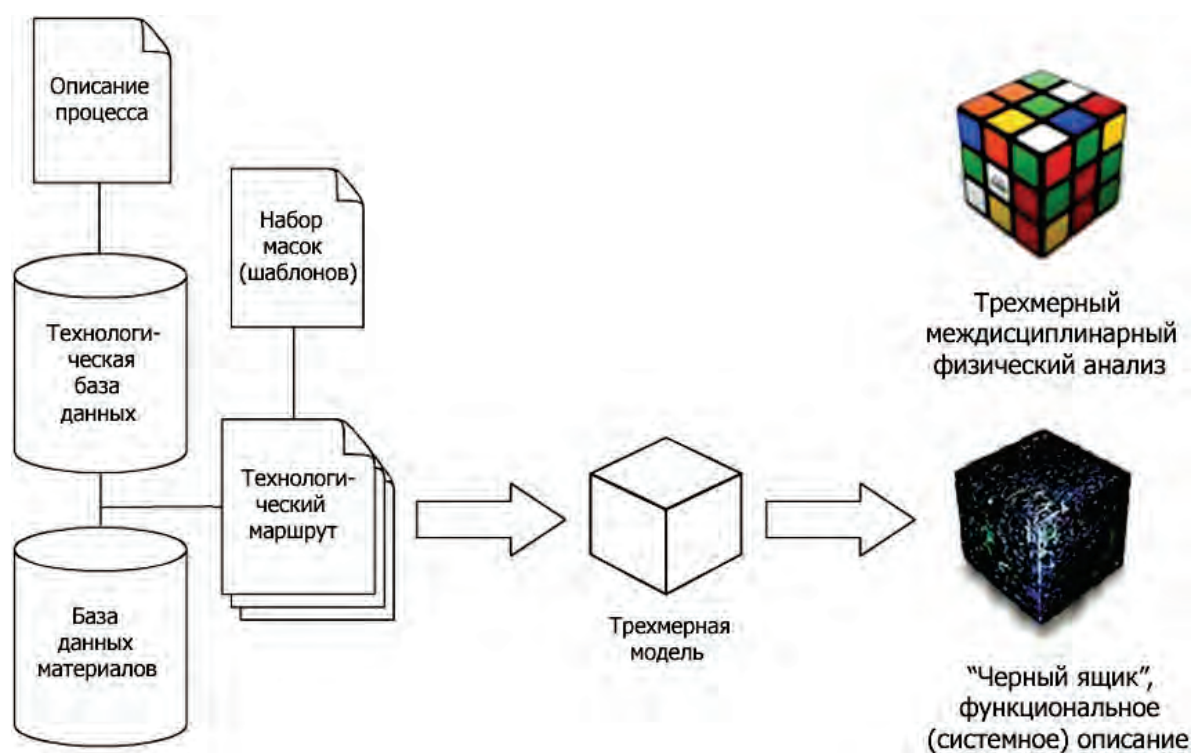


Рис. 5.2. Восходящий процесс проектирования на основе трехмерной модели

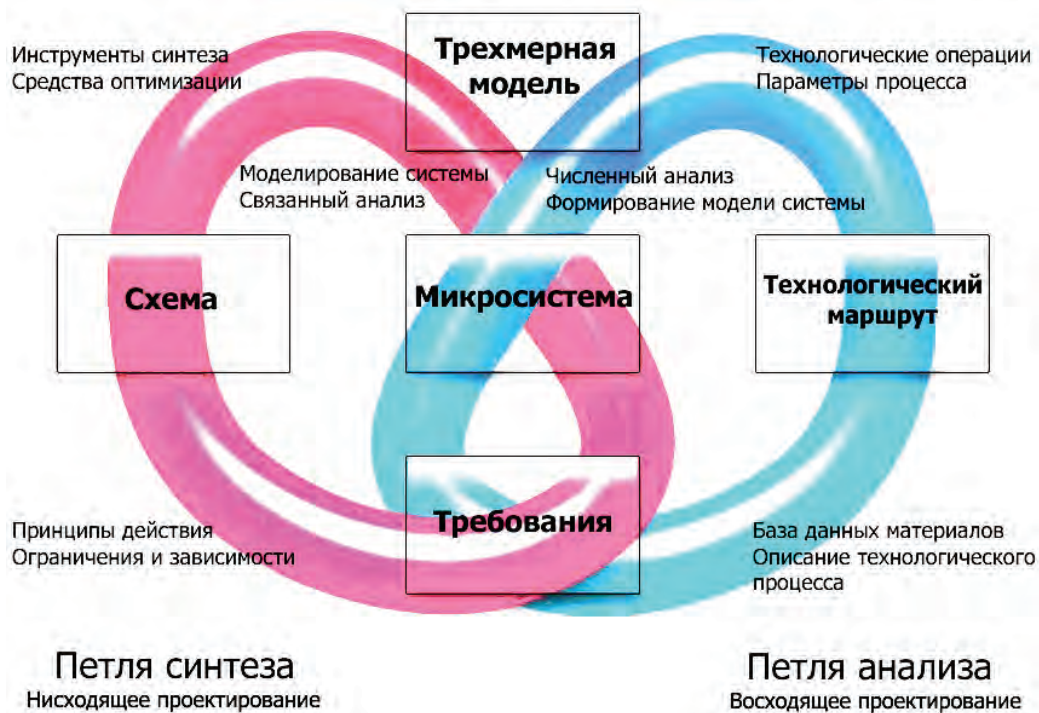


Рис. 5.3. Объединение нисходящего и восходящего процессов проектирования



Рис. 5.4. Интеграция основных этапов проектирования МЭМС

Концепция проектирования МЭМС в пакете IntelliSuite строится на основе объединения обоих подходов, что позволяет реализовать в полной мере их главные достоинства – повышение точности результата и снижение затрат времени на разработку (рис. 5.3, 5.4).

Методология нисходящего проектирования позволяет быстро исследовать широкий диапазон вариантов проекта, в то время как восходящее проектирование с самого начала обеспечивает выбор правильной технологии формирования микроструктуры.

Диаграмма, приведенная на рис. 5.4, показывает взаимосвязь этапов проектирования и анализа устройств МЭМС на различных уровнях в IntelliSuite. Пакет IntelliSuite обеспечивает гибкие процедуры взаимодействия основных вычислительных модулей и баз данных, а также инструментов синтеза, оптимизации, моделирования технологического процесса, средств формирования геометрической модели или извлечения структурной модели системы.

Проектирование «сверху вниз», основанное на схемном решении, опирается на модель устройства, построенную по иерархическому принципу. Одним из основных преимуществ такого подхода является то, что вход в проект выполняется в терминах основных составных блоков или компонентов. Это позволяет пользователю вводить параметризованную модель устройства как с помощью топологического описания, так и в виде технологических данных.

Так как ввод данных производится в терминах параметризованных абстрактных моделей, пользователи могут анализировать устройства при различных степенях детализации. Элементарная модель компонента может быть представлена в терминах упрощенных моделей, распределенных моделей или основанных на методе Рэлея – Ритца численных моделях.

Одним из недостатков проектирования на основе схемы устройства является то, что пользователь ограничен использованием компонентов из имеющейся библиотеки проектирования. Необходимость применения произвольных конфигураций, новых физических моделей или моделей материалов связано с дополнительными трудностями. Так как большинство схемных моделей в известной степени базируется на упрощенных моделях, они не могут точно отражать эффекты второго порядка и другие нелинейные свойства.

Так, например, корректное описание явлений в области электростатики, гидродинамики или физики контакта и остаточных деформаций для произвольной геометрии требует применения полного трехмерного моделирования. Точно так же ряд эффектов, связанных с корпусированием, в частности, влияние вязкоупругих взаимодействий или влияние подложки трудно учесть в схемных моделях.

Проектирование «снизу вверх», основанное на трехмерной модели или топологии устройства, обычно используемое для разработки механи-

ческих устройств, все еще является популярной методологией при проектировании МЭМС.

Разработка на основе топологии основывается на наборе масок (фотошаблонов) и технологическом процессе для формирования трехмерной твердотельной модели устройства. Анализ твердотельных моделей производится с использованием трехмерных численных моделей методом конечных (граничных) элементов. Привлекательность проектирования на основе топологии обусловлена возможностью совместного решения задач разработки конструкции и технологии изготовления.

Кроме того, восходящее проектирование позволяет полностью охватить сложный междисциплинарный анализ, необходимый для исследования устройств МЭМС.

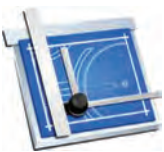
5.2. Основные компоненты пакета IntelliSuite

Пакет IntelliSuite, как и большинство других программных средств САПР, имеет модульную структуру, а также широкий диапазон инструментов, обеспечивающих единый непрерывный процесс проектирования МЭМС от схемы и оптимизации устройства до проверки проекта и выдачи рабочих фотошаблонов.

В табл. 5.1 представлены основные инструментальные модули, входящие в пакет, и дана их краткая характеристика.

Таблица 5.1

Основные инструменты пакета IntelliSuite

Инструмент		Основные функциональные возможности
	Synple	Формирование схемы устройства с использованием моделей элементов Исследование характеристик устройства на основе схемы Синтез маски и трехмерной модели
	Blueprint	Создание модели устройства (с возможностью использования параметризации) Разработка топологии с проверкой правил проектирования Генерация гексагональной сеточной модели Подготовка фотошаблонов
	Clean Room	Разработка технологического маршрута Отладка технологии Визуализация технологической обработки

Инструмент		Основные функциональные возможности
	Fast Field	Многодисциплинарный физический анализ Связанный междисциплинарный физический анализ Формирование функциональной модели
	EDA Linker	Связь с EDA инструментами: Cadence, Mentor, Synopsys, Ansoft, Mathworks и др.

Гибкий процесс проектирования позволяет начинать разработку не только со схемного решения, но и с топологии или от трехмерной геометрической модели.

Взаимодействие основных модулей IntelliSuite в процессе разработки МЭМС иллюстрируется рис. 5.5.

Модуль Synple обеспечивает работу со схемой устройства МЭМС аналогично SPICE-программам для электрических схем. При этом в проект могут быть оперативно внесены уточнения и произведена оптимизация при различных степенях детализации. Благодаря специальным алгоритмам синтеза обеспечивается автоматическое преобразование схемного решения в топологию, трехмерную твердотельную, а также сеточную модель, используемую для полного физического анализа.

Blueprint является инструментом для разработки геометрических моделей, включая формирование топологии, проверку правил проектирования, построение сечений структуры устройства, автоматическое создание маски и генерацию гексагональной сетки.

Модуль CleanRoom представляет собой набор инструментов технологического моделирования, предназначенный для разработки и отладки технологического процесса и соответствующего набора масок до начала реального изготовления устройств МЭМС. Этот инструмент позволяет получать виртуальные образцы изделий, определять и исключать конструктивно-технологические ошибки.

Специализированный модуль Fastfield включает ряд инструментов, обеспечивающих выполнение многодисциплинарного анализа, в том числе электростатического, механического, микрогидроаэродинамического и электромагнитного. Процедура понижения порядка модели базируется на методах извлечения (экстракции), охватывающих различные физические эффекты и позволяющих привести физические модели к компактной форме.

Компоновщик EDA (EDA Linker) обеспечивает передачу данных между пакетом IntelliSuite и другими известными EDA инструментами.



Рис. 5.5. Процесс проектирования МЭМС в пакете IntelliSuite

Рассмотрим основные этапы проектирования МЭМС с использованием описанных инструментальных средств пакета IntelliSuite.

5.3. Разработка схемы. Модуль Synple

Разработка схемы и выполнение на ее основе анализа устройства МЭМС обеспечивается в пакете IntelliSuite модулем Synple.

К задачам, решаемым модулем Synple, относятся следующие (табл. 5.2).

- Инструментальное обеспечение построения схемы разрабатываемого устройства с возможностью параметризации для исследования проекта. В схеме могут использоваться специальные виды соединений Multiphysics Bus, описывающие физические взаимодействия различной природы.
- Иерархическое моделирование устройства на системном или схемном уровне.
- Моделирование характеристик устройства с учетом тепловых, электрических, механических, пьезоэлектрических и электронных процессов с помощью компактных моделей. Сокращение времени анализа при этом может достигать 100–1 000 раз по сравнению с моделированием методом конечных элементов.
- Исследование и оптимизация проекта. Оперативное моделирование и изучение множества проектов.
- Переход от схемы к трехмерным моделям.

Таблица 5.2

Функции модуля Synple

Функция		Основные возможности
	Разработка схемы	Исследование устройства Оптимизация Формирование геометрической модели устройства
	Многодисциплинарный анализ на основе схемы	Механика Демпфирование / Рассеяние Электростатика Пьезоэлектрический эффект Анализ сигналов Системы управления
	Синтез модели на основе схемы	Переход от схемы к маске Переход от схемы к трехмерной модели Переход от схемы к сеточной модели
	Прогнозирование результата разработки	Проектирование для производства Исследование влияния параметров проекта Оценка результата разработки
	Связь с другими инструментами	Автоматизация создания сеточной модели Связь с технологическим проектированием Связь с ModeFrontier, Phoenix Integration и другими инструментами оптимизации

В отличие от других инструментов, в которых используется редактор электрической схемы, Synple обладает специально разработанным схемным редактором, обеспечивающим выполнение многодисциплинарного анализа устройств МЭМС. Элементы могут быть соединены связями, описывающими «шину мультифизики» («Multiphysics Bus»), которая передает механические, электрические, гидроаэродинамические и температурные воздействия и сигналы между элементами схемы. Инструмент многодисциплинарного анализа с параллельной обработкой массивов позволяет выполнять сложный связанный анализ, охватывающий различные физические эффекты, а также аналоговые и другие электрические элементы схемы (такие как транзисторы, операционные усилители, логические элементы и т. д.) и элементы управления (такие как PID и т. д.). Synple помогает оптимизировать разработку, исследовать технологические проблемы и быстро приходить к окончательному решению, пригодному для запуска в производство.

Разработка схемы

При работе со схемой в редакторе Synple доступны следующие виды компонентов:

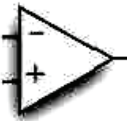
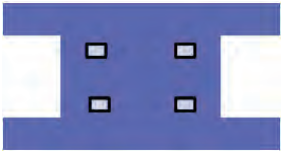
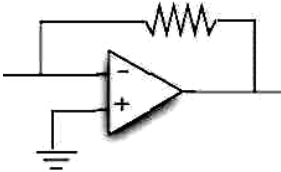
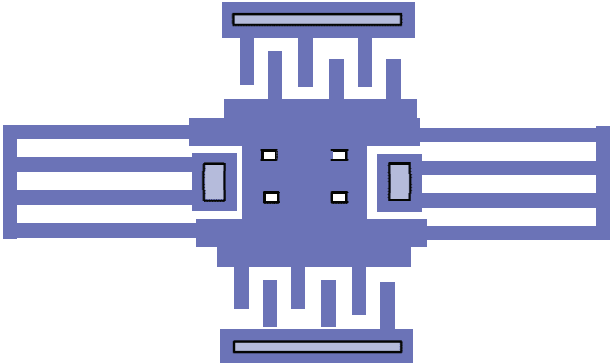
- электрические компоненты (Electrical);
- механические процессы (Structural Mechanics);
- логические, цифровые (Digital);
- тепловые (Thermal);
- электронные (Electronics);
- МЭМС (MEMS);
- управляющие (Controls);
- описываемые макромоделями (MacroMODEL).

В табл. 5.3. представлены примеры некоторых элементов, используемых в схемном редакторе Synple.

Таблица 5.3

Примеры элементов, используемых в схемном редакторе

Уровень сложности	Электрорадиоэлементы	Элементы МЭМС
Простые элементы	 Транзистор, R, L, C-элементы	 Плата Стержень Якорь Зазор

Уровень сложности	Электрорадиоэлементы	Элементы МЭМС
Сложные (интегральные) элементы	 Операционный усилитель	 Подвижная масса  Пружина подвеса подвижной массы  Гребенчатый привод
Устройства	 Схема усиления	 Резонатор

Пример фрагмента схемы МЭМС, выполненного в редакторе Synple, приведен на рис. 5.6. Общий вид рабочего окна схемного редактора Synple приведен на рис. 5.7 и 5.8.

Специализированные инструменты редактора обеспечивают автоматическое выполнение соединений, включая «шину мультифизики», отображение напряжений и токов, упрощенный ввод параметров, оперативное включение в схему компонентов и симуляцию тепловых, электрических, механических, пьезоэлектрических процессов и электронных компонентов.

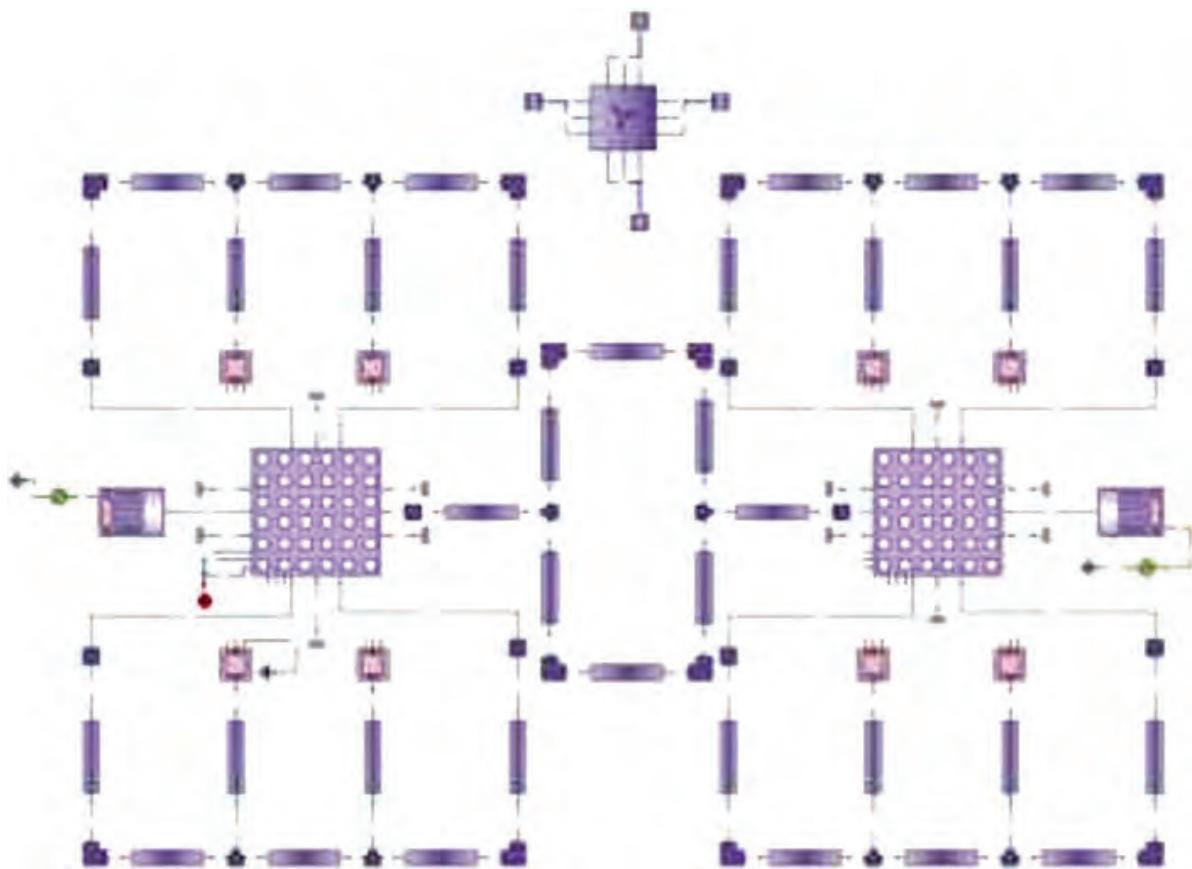


Рис. 5.6. Схема полосно-пропускающего фильтра, выполненная в редакторе Synple

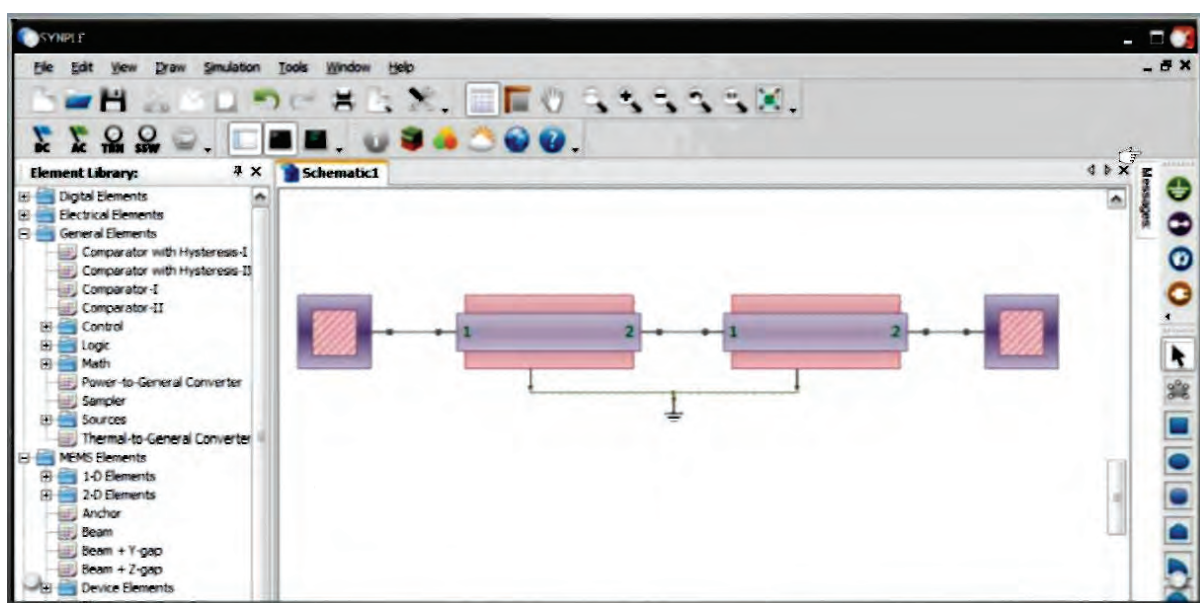


Рис. 5.7. Создание схемы СВЧ микромеханического переключателя в редакторе Synple

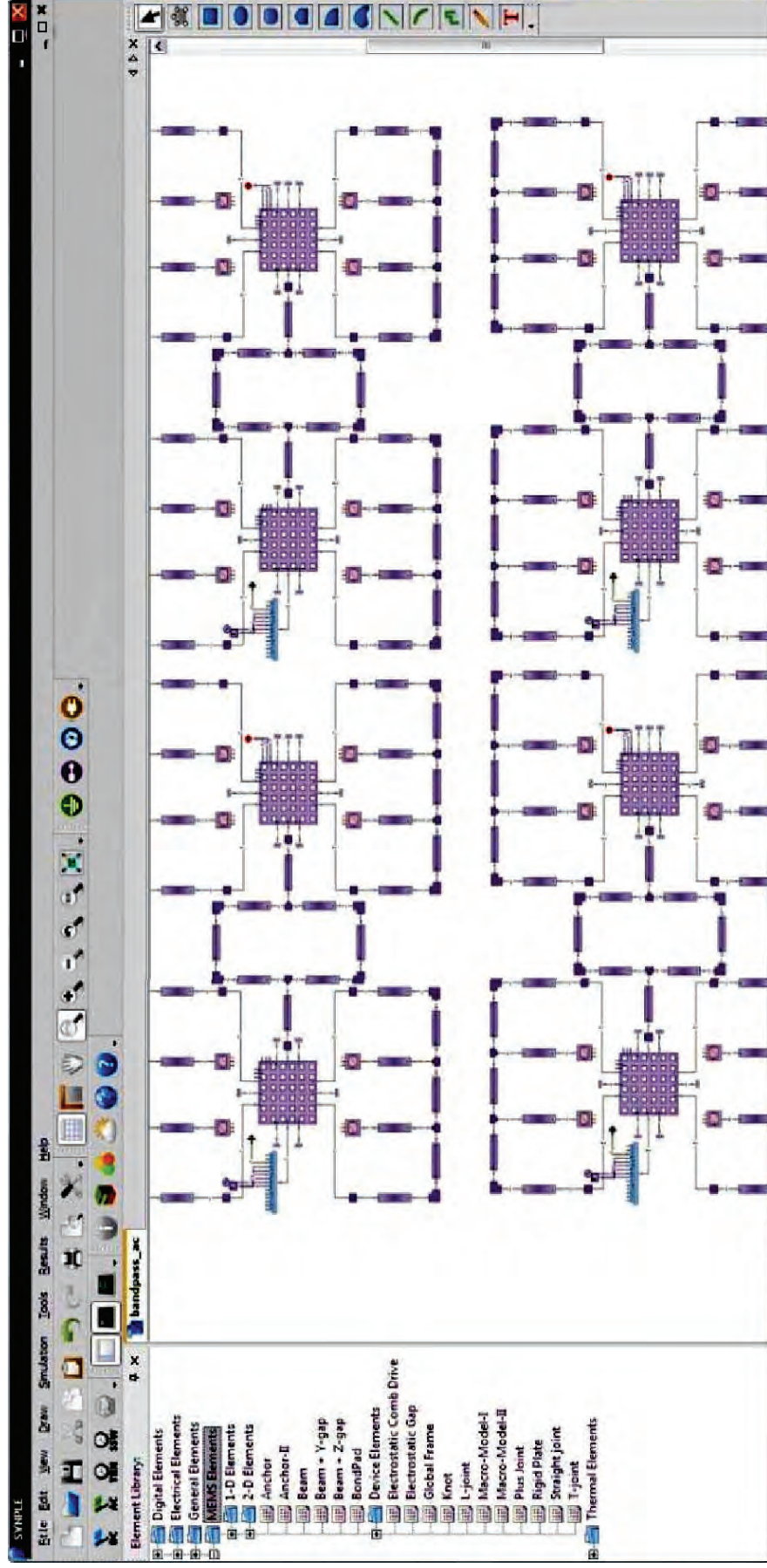


Рис. 5.8. Рабочее окно схемного редактора инструмента Synple пакета IntelliSuite

Редактор Synple позволяет работать с большим массивом элементов МЭМС, таких как прямолинейные и изогнутые стержни, соединения, эластичные и жесткие пластины, электростатические приводы и чувствительные элементы. Дополнительные возможности обеспечиваются благодаря использованию параметрических моделей.

Многодисциплинарный анализ на основе схемы

Многодисциплинарный анализ с использованием компактных поведенческих моделей, основанных на схемном описании, позволяет оперативно производить связанный анализ. Synple соединяется с WaveRunner, инструментом для отображения динамических процессов, аналоговых и смешанных сигналов.

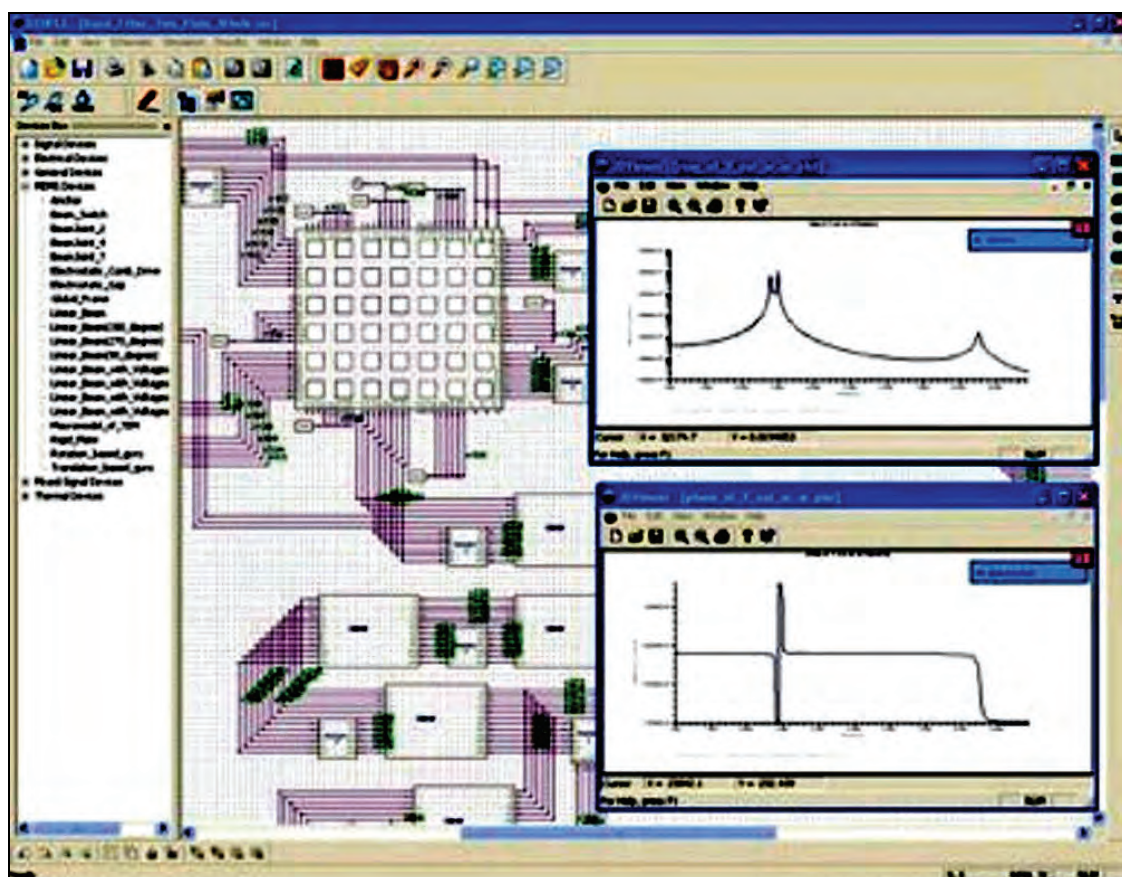


Рис. 5.9. Расчет характеристик полосно-пропускающего фильтра

На рис. 5.9 показан пример расчета амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик перестраиваемого полосно-пропускающего фильтра, конструкция которого включает стержни (beams), пластины (plates), гребенчатые элементы (comb-drives) и якоря (anchors).

Время расчета характеристик на основе компактной модели составляет около 30 секунд при длительности расчета с использованием трехмерного численного анализа 4 часа.

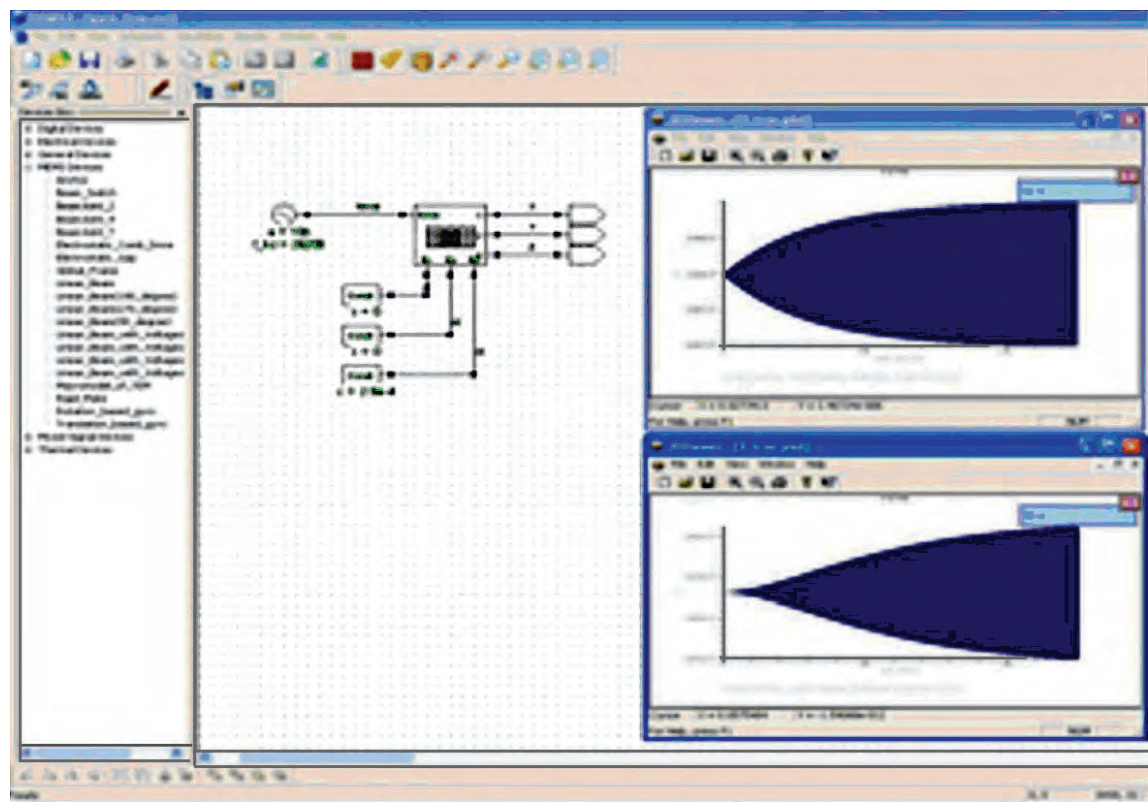


Рис. 5.10. Расчет переходного процесса в вибрационном гироскопе

SYNPLE работает со многими известными составными элементами, что позволяет оперативно проверить принятые решения. На рис. 5.10 показан пример расчета переходного процесса при запуске вибрационного гироскопа.

Синтез модели на основе схемы

Инструменты синтеза схем, включенные в SYNPLE, позволяют конвертировать схемные решения на основе компонентов в готовые к использованию топологические маски или гексаэдральные сетки, которые могут далее использоваться в трехмерном анализе микросистем (рис. 5.11, 5.12).

Инструменты конвертирования Synple включают усовершенствованные алгоритмы, преобразующие схему в готовый к производству топологический рисунок. Дополнительные детали топологии, учитывающие распределение механических напряжений, впадины, компенсацию травления,

генерируются автоматически, снижая затраты времени на выполнение рутинных операций.

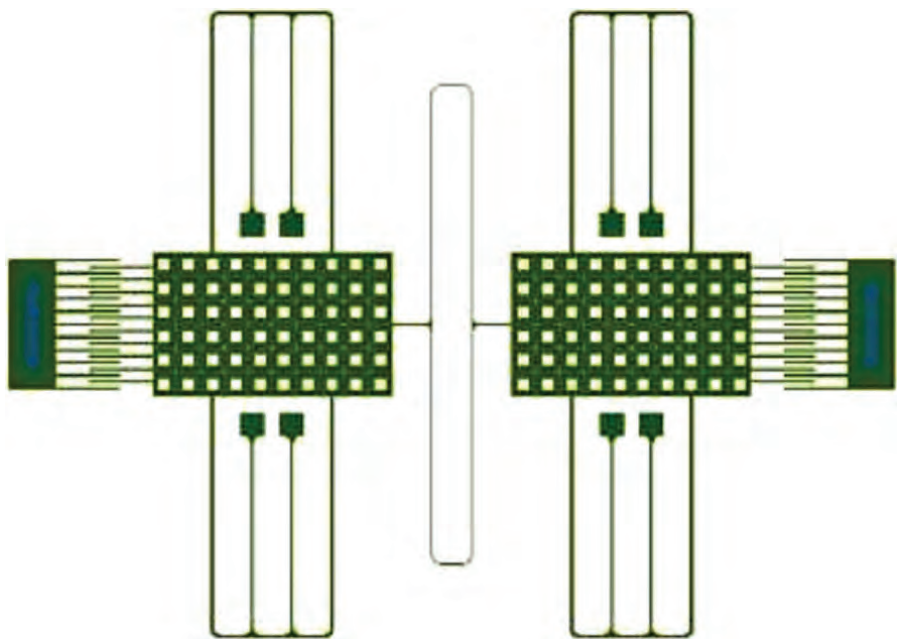


Рис. 5.11. Рисунок маски, полученной на основе схемы

Synple позволяет получить трехмерную геометрическую модель на основе схемы. Пример такой модели приведен на рис. 5.13.

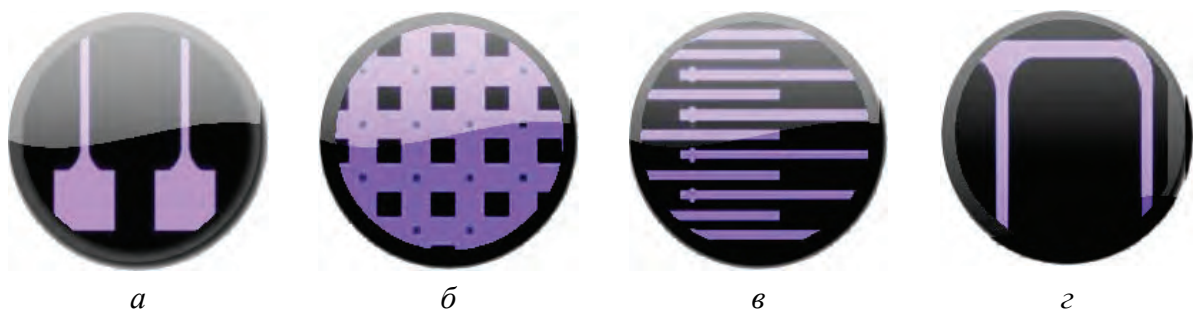


Рис. 5.12. Элементы маски: *а* – кривые, учитывающие рельеф механических напряжений; *б* – впадины; *в* – элементы гребенчатой структуры; *г* – компенсация эффектов травления

Кроме того, Synple имеет связь с инструментом Hexpresso, предназначенным для автоматической генерации на основе схемы трехмерной гексаэдральной сеточной модели, которая может использоваться в дальнейшем в многодисциплинарном физическом анализе (рис. 5.14).

Следует отметить, что инструмент Nexpresso обеспечивает построение сеточной модели на основе маски и описания технологического процесса.

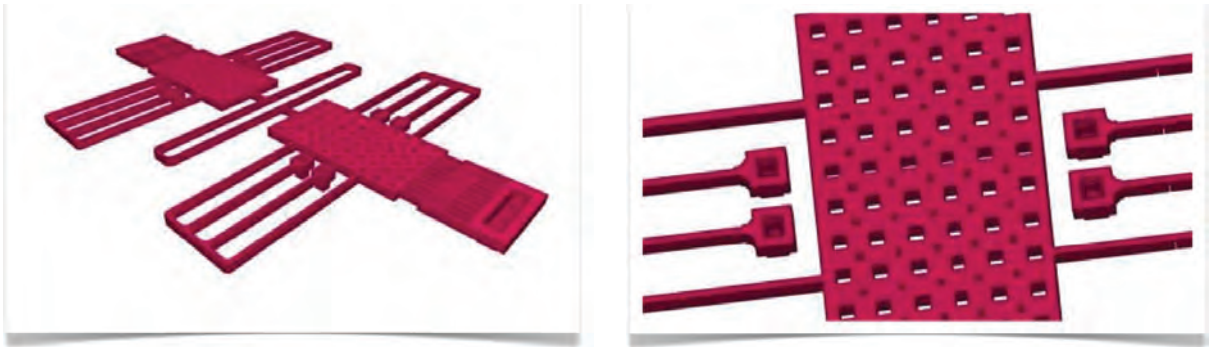


Рис. 5.13. Формирование трехмерной геометрической модели устройства МЭМС

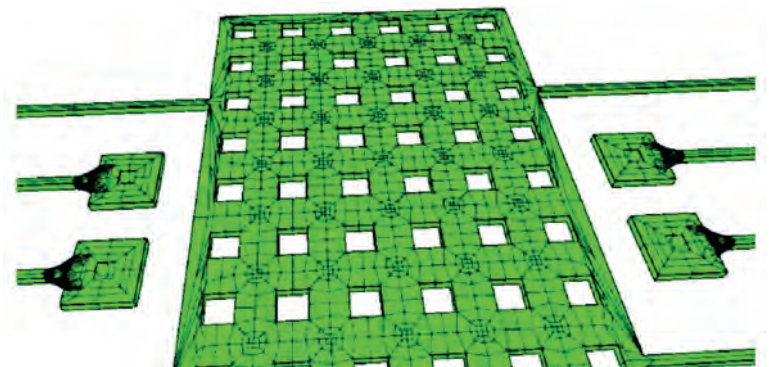


Рис. 5.14. Сеточная модель, сформированная на основе схемы устройства МЭМС

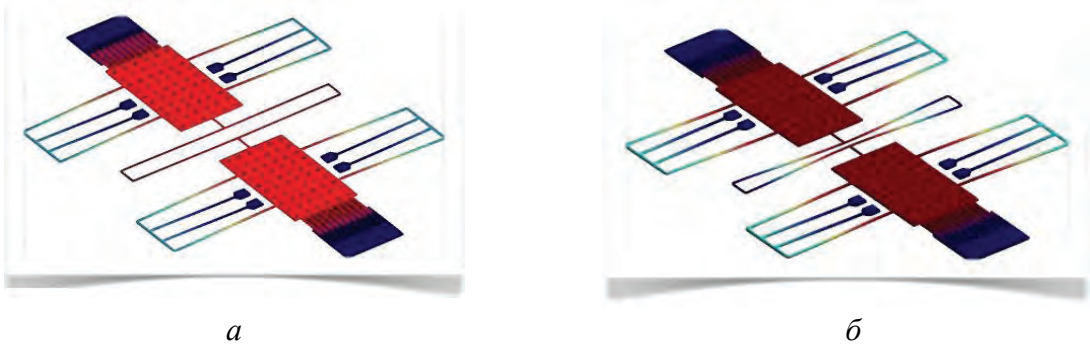


Рис. 5.15. Вид колебаний структуры МЭМС в различных режимах:
а – синфазные колебания; *б* – противофазные колебания

На базе схемы, разработанной в редакторе Synple, также обеспечивается визуализация результатов моделирования в трехмерном виде и построение анимации динамических процессов благодаря прямой связи Synple с инструментом анализа результатов VisualEase (рис. 5.15).

Прогнозирование результата разработки

Интеграция инструментальных средств SYNPLE позволяет исследовать воздействие параметров проекта на окончательный результат разработки и производства устройства МЭМС (рис. 5.16).

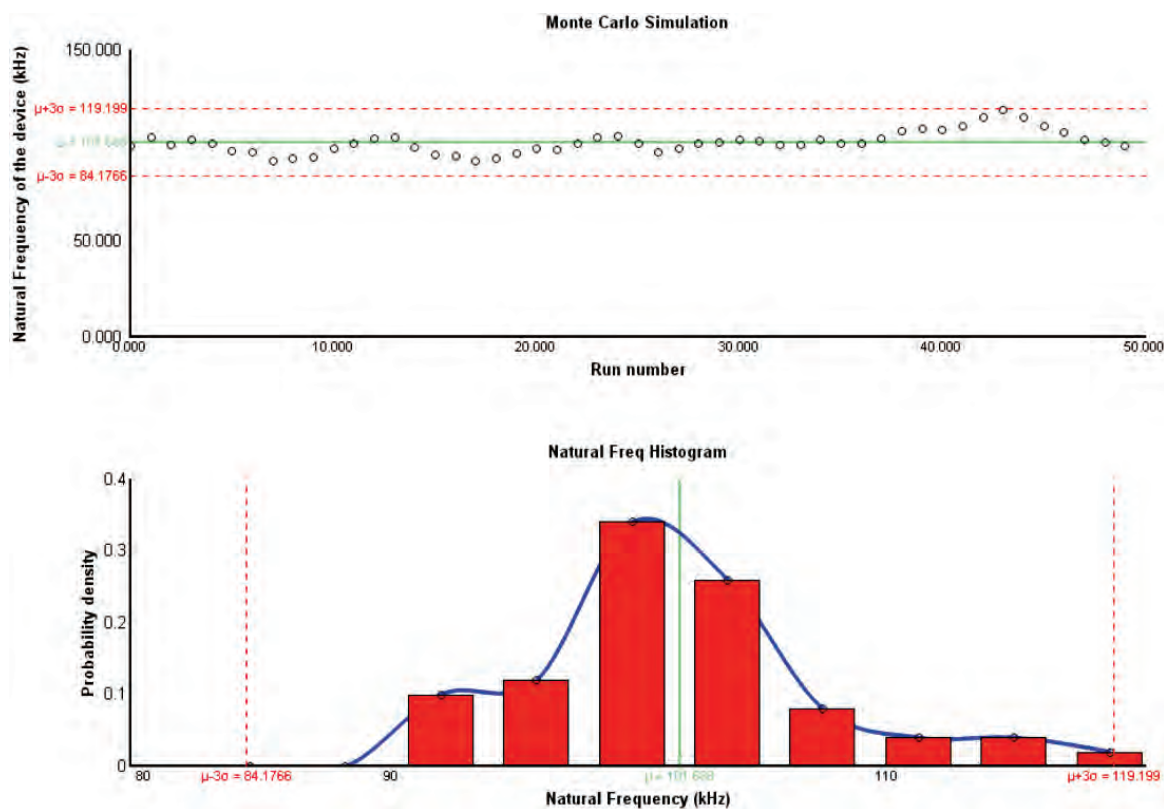


Рис. 5.16. Анализ вариаций параметров устройства, основанный на методе Монте-Карло

Приведенные на рис. 5.16 графики показывают результаты моделирования вариаций основной частоты полосно-пропускающего фильтра методом Монте-Карло.

Для оценки результата разработки на окончательной и промежуточных стадиях проектирования используются различные инструменты: виртуальное прототипирование и трехмерная визуализация на разных этапах создания устройства, определение свойств структуры и базы данных, инструменты оптимизации, симуляторы химического («жидкого») и ионно-плазменного («сухого») травления, инструменты моделирования методом Монте-Карло.

Таким образом, процедуры проектирования, ориентированные на реальное производство (Design for Manufacturing – DFM), позволяют минимизировать затраты времени для выбора конструкции и технологии изготовления изделия.

Modify Layer Properties

General Color

Layer Properties

Number: 1

Name: Layer 1

Thickness: 2 um

Elevation: 2 um

Sidewall Angle (Left): 90 Degree

Sidewall Angle (Right): 90 Degree

OK Cancel

Рис. 5.17. Общие свойства слоев

Material Property Manager

Material: [Icons]

Polysilicon

Polysilicon	
Density (Kg/m ³)	2.3
Young (GPa)	160
Poisson ()	0.22
Resistivity (ohm*m)	2E-5
thermal_coeff_expansion ()	2.33E-6
residual_stress (Pa)	0
strain_gradient (um/m)	0
theta_left (Deg)	90
theta_right (Deg)	90
Thermal_conductivity (W/C*r)	2.5E-3
TCR1 (1/K)	8.3E-4
TCR2 (1/K ²)	5E-7
PI 11 (1/Pa)	6.6E-11

Close

Рис. 5.18. Определение параметров материалов

Связь с технологическим проектированием

Подпрограммы модуля Synple обеспечивают связь схемного описания устройства с технологическими моделями, описывающими топологию, характеристики слоев, параметры используемых материалов (рис. 5.17–5.19).

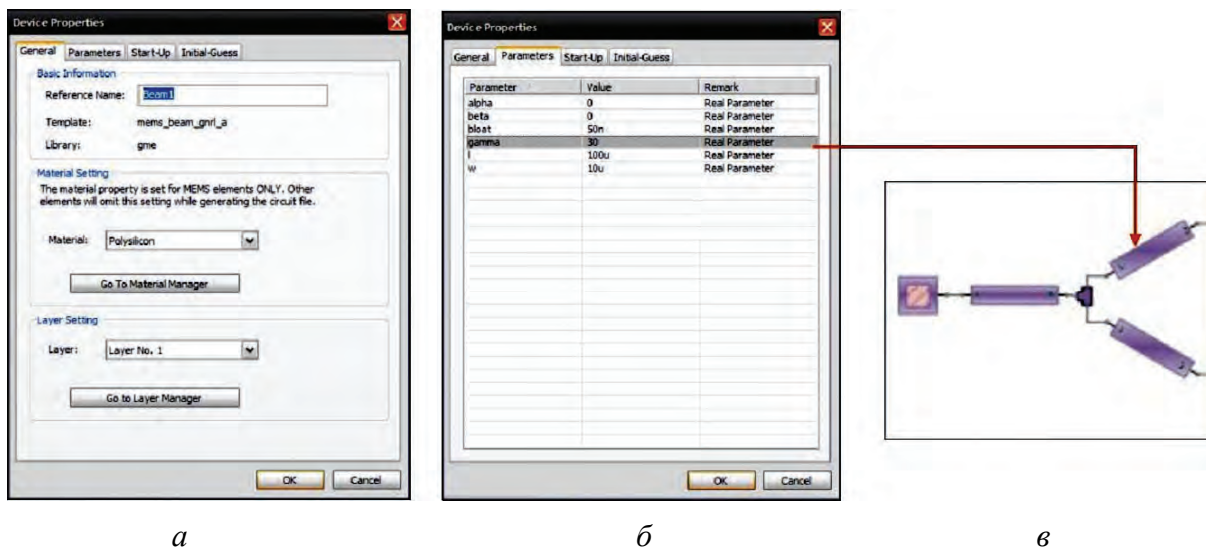


Рис. 5.19. Упрощенный ввод данных параметров структуры: *а* – определение слоя и материала; *б* – ввод параметров; *в* – отображение геометрии в схеме

Изображенное на рис. 5.17 рабочее окно менеджера технологии предназначено для указания свойств слоев структуры МЭМС.

Указанные таким образом параметры автоматически включаются в соответствующие вычисления при моделировании на дальнейших этапах. Аналогичным образом задаются свойства материалов, которые также используются в процессе разработки на этапах топологического и технологического проектирования.

5.4. Разработка топологии Модуль Blueprint

Модуль Blueprint является интегрированным инструментом, предназначенным для топологического моделирования, проверки разработки масок (фотошаблонов). Основные функциональные возможности Blueprint представлены в табл. 5.4.

Функции модуля *Blueprint*

Функция		Основные возможности
	Разработка топологии	Разработка оптимальной для МЭМС топологии Аналогичный AutoCAD интерфейс Библиотека проектирования Поддержка иерархической организации модели Использование специализированных слоев Средства идентификации Работа со сценариями
	Проверка правил проектирования	Редактор создания фотошаблонов Иерархическая проверка правил проектирования Поддержка произвольной геометрии Навигатор ошибок
	Визуализация топологии	Трехмерная визуализация топологии Построение сечений структуры устройства МЭМС
	Генерация сетки (Hexpresso)	Автоматизированное создание гексаэдральной сеточной модели Упрощенное управление построением сетки

Модуль *Blueprint* включает в себя топологический редактор, разработанный специально для проектирования МЭМС. Редактор имеет интерфейс, аналогичный известному пакету *AutoCAD*, что облегчает его освоение (рис. 5.20). Каждый элемент *Blueprint* от меню до панелей инструментов и сочетания «горячих» клавиш может быть настроен пользователем индивидуально. Инструменты управления слоями, видом изображения и его фрагментами облегчают работу с топологией.

Blueprint обеспечивает также ряд дополнительных функций помимо работы с топологией. Встроенная поддержка сценария позволяет автоматизировать создание сложных геометрических объектов (рис. 5.21).

Функции *Blueprint* полностью могут быть описаны в сценарии, позволяя создать сложные параметрические ячейки и рисунки. *Blueprint* обеспечивает полную поддержку *Windows Script Host (WSH)*. Для написания сценария доступно использование языка *VBScript* или другого языка по выбору (*Jscript*, *Python*, *Perl*, *Tcl/Tk*) при установке соответствующей поддержки.

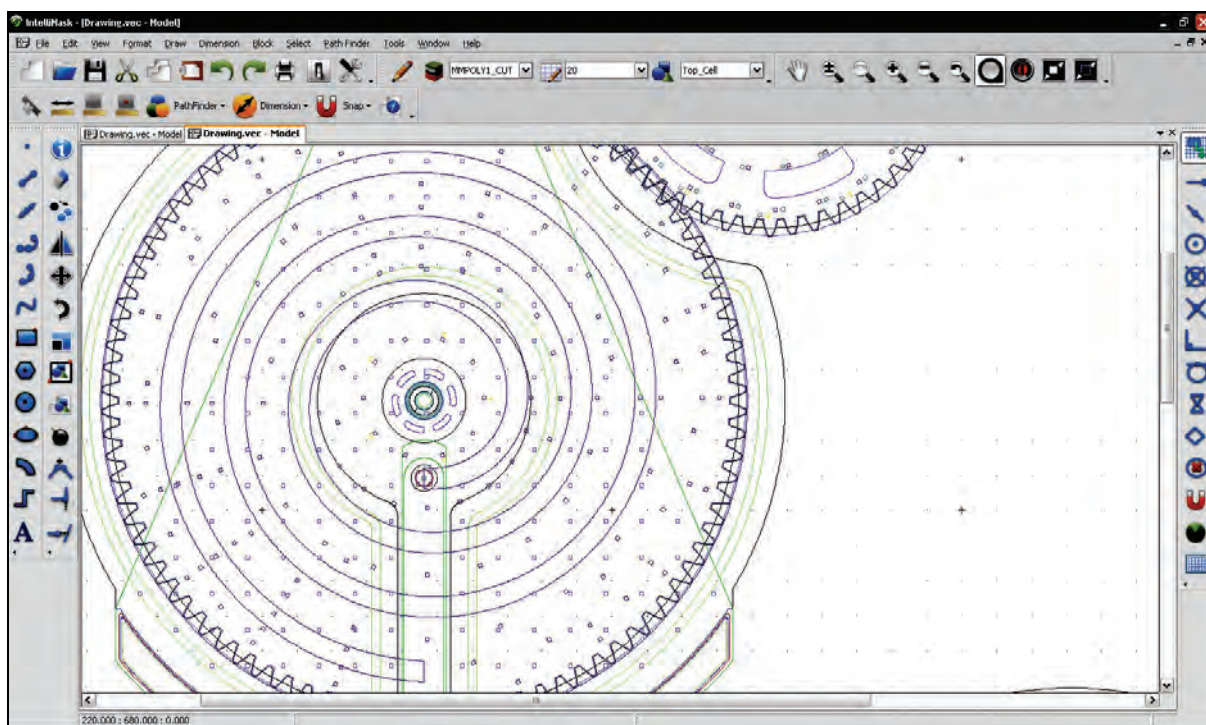


Рис. 5.20. Интерфейс топологического редактора Blueprint

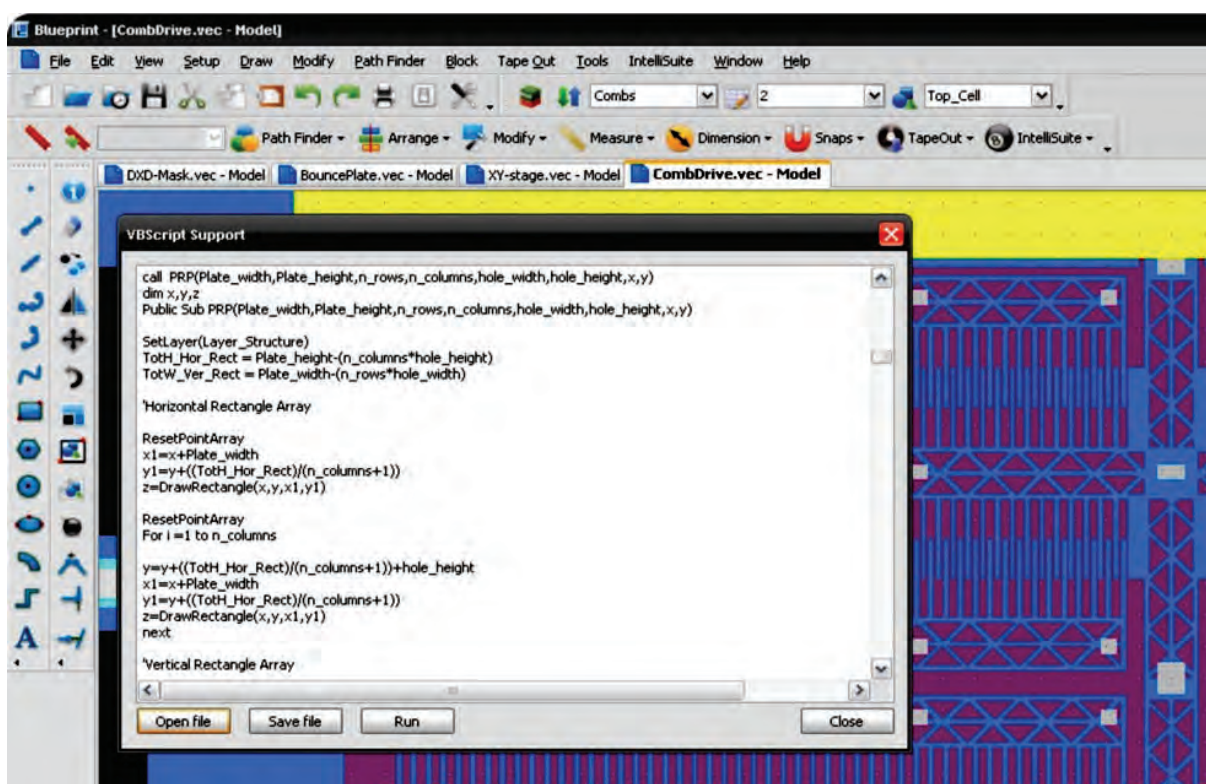


Рис. 5.21. Окно сценария в редакторе Blueprint

В пакете представлена библиотека готовых сценариев, которые могут быть при необходимости переработаны пользователем.

Blueprint поддерживает инструмент Tape Out проверки правил проектирования (DRC – Design Rules Checking), обеспечивающий верификацию проекта топологии на наличие ошибок и ее подготовку к передаче в технологическую модель Clean Room. Специальный алгоритм обеспечивает работу с рисунком топологии для произвольных углов. Навигатор ошибок ErrorNav позволяет оперативно идентифицировать ошибки (рис. 5.22).

Индикация ошибок

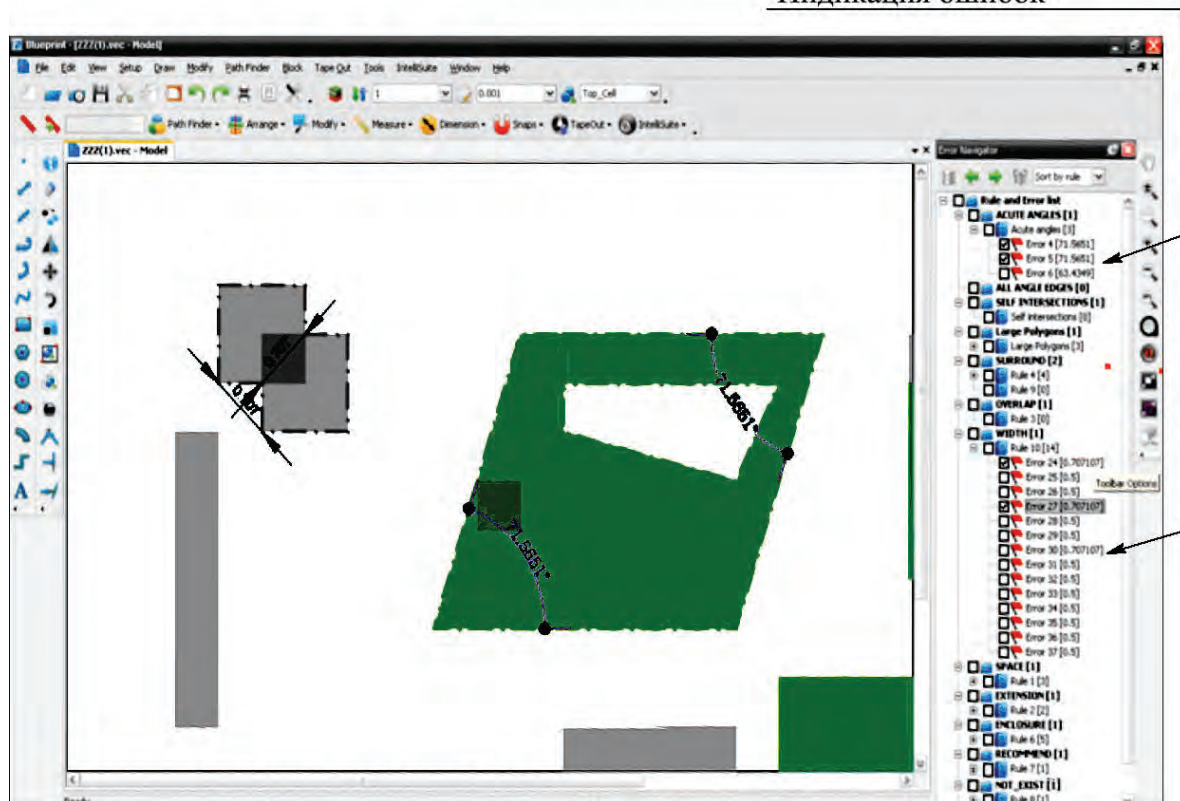


Рис. 5.22. Индикация ошибок топологии в редакторе Blueprint

Blueprint также позволяет передавать данные инструменту CSViewer (Cross Sections Viewer), предназначенному для построения сечения разрабатываемого устройства вдоль любого линейного сегмента. CSViewer опирается на топологическую модель. Он позволяет исследовать сечения виртуального прототипа структуры по ходу выполнения этапов технологического процесса. Для этого достаточно выбрать необходимую ссылку на технологический маршрут и начертить линию через любую часть маски, после чего автоматически выполняется построение поперечного сечения устройства вдоль указанной линии.

Разработанная в Blueprint топология также может использоваться для получения трехмерной модели, в том числе с сечением по произвольной плоскости благодаря автоматическому экспорту данных в FabViewer – инструмент визуализации технологического процесса IntelliSuite (рис. 5.23).

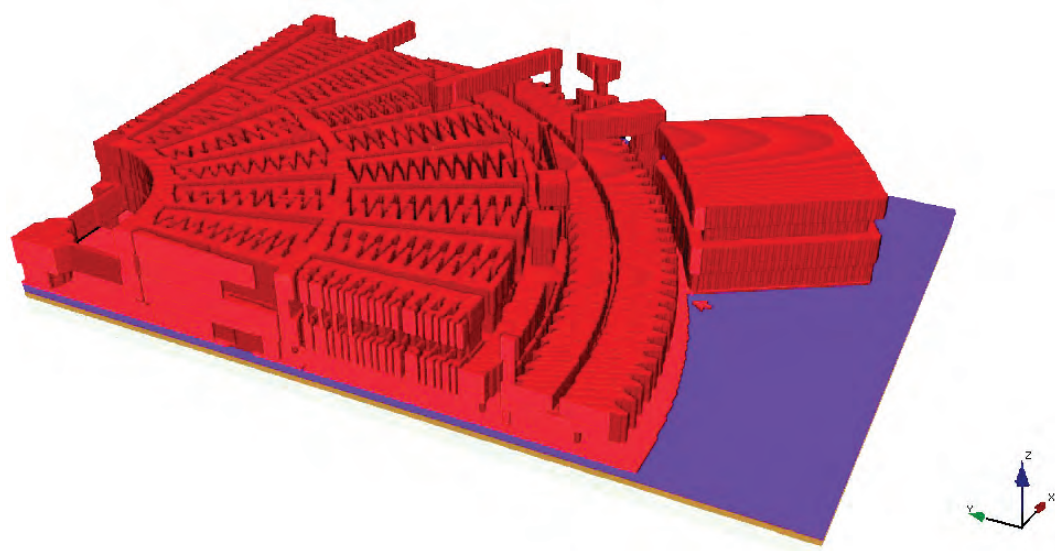


Рис. 5.23 Сечение микродвигателя с электростатическим приводом

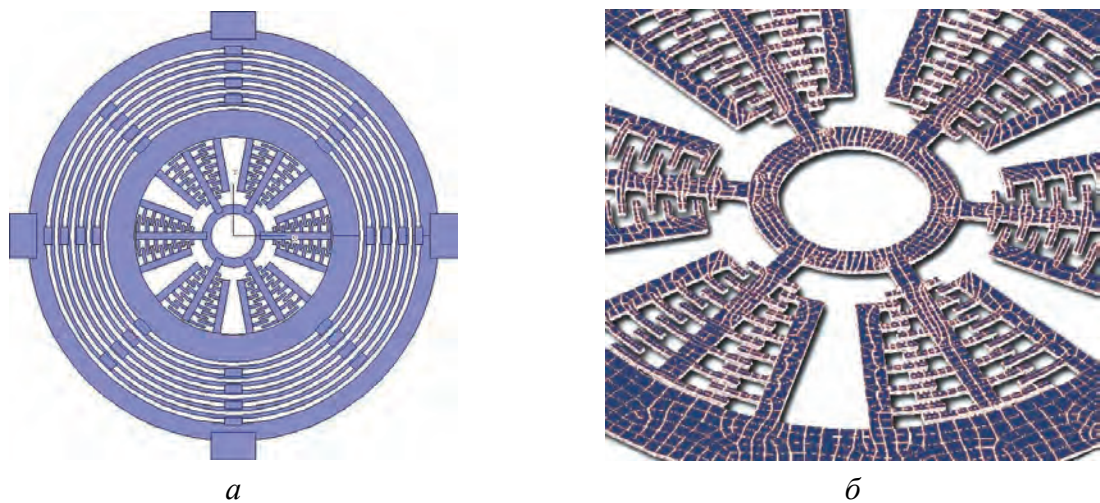


Рис. 5.24. Построение гексагональной сетки на основе топологической модели

Модуль Blueprint как и Synple, интегрирован с инструментом создания гексагональной сеточной модели Hexpresso. При этом сетка формируется на основе макета маски и описания технологического маршрута. Параметризация сеток основывается на параметрах проекта, таких как толщина пленки, электростатические зазоры, углы стенок и скосов и др. (рис. 5.24).

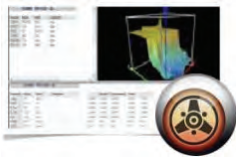
Следует отметить, что помимо Blueprint фирмой IntelliSense Software разработаны программные продукты IntelliMask Pro и 3D Builder. Первый из них аналогично Blueprint позволяет выполнять разработку топологии МЭМС, второй – построение трехмерных геометрических (сеточных) моделей устройств.

5.5. Разработка технологического процесса

Для разработки технологии изготовления устройств МЭМС в пакете IntelliSuite предназначен модуль Clean Room. Основные инструменты модуля и выполняемые ими функции приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Функции модуля Clean Room

Функция		Основные возможности
	Разработка технологического маршрута (IntelliFAB)	Формирование технологического маршрута Отладка маршрута Создание технологических баз данных
	Базы данных материалов (MEMaterial)	Описание свойств материалов Связь баз данных материалов с технологическим процессом
	Моделирование технологических процессов	FABViewer – визуализация процесса обработки AnisE – симулятор анизотропного травления IntelliEtch – атомистический симулятор травления RECIPE – средство моделирования реактивного ионного травления (RIE/ICP)
	Генерация сетки (Hexpresso)	Автоматизированное создание гексаэдральной сеточной модели Упрощенное управление построением сетки

Разработка технологического маршрута

Инструмент IntelliFAB обеспечивает разработку и отладку технологического маршрута и набора фотошаблонов до начала производства. Про-

цесс отладки технологии основывается на создании виртуальных прототипов, позволяющих обнаружить и избежать в дальнейшем дорогостоящих ошибок при реальном производстве.

Таким образом, IntelliFAB выполняет следующие функции:

- отладки технологического маршрута;
- визуализации технологического маршрута;
- совместного использования технологических маршрутов в производстве;
- создания виртуального прототипа устройства с использованием технологических процессов реального производства;
- выявления ошибок технологической обработки;
- автоматической генерации сетки для разрабатываемого устройства.

Технологический маршрут изготовления устройства автоматически формируется на основе описания схемы и файла, содержащего информацию об используемой технологии. Рабочее окно IntelliFAB показано на рис. 5.25.

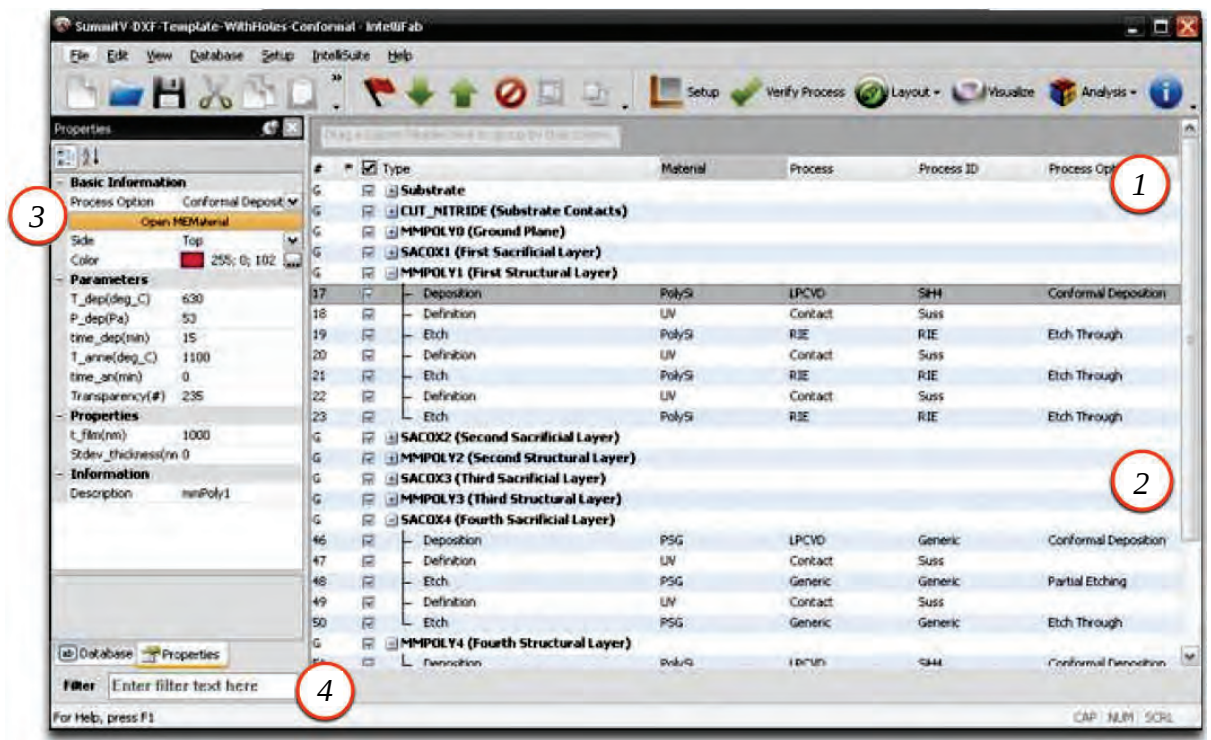


Рис. 5.25. Рабочее окно инструмента IntelliFAB: 1 – редактор технологического маршрута; 2 – записи в редакторе технологического процесса; 3 – окно свойств процесса; 4 – окно «фильтр» (Filter)

На рисунке цифрами отмечены следующие рабочие области окна IntelliFAB:

1 – редактор технологического маршрута. В этой части окна IntelliFAB производится формирование и редактирование таблицы маршрута. Установка планируемого виртуального маршрута выполняется в соответствии с тем, как он должен выполняться на реальном производстве;

2 – структурная организация технологического маршрута в группы, секция. Объединение процессов в поднаборы делает организацию сложного маршрута легкой. Технологический процесс можно группировать по любому из требуемых признаков: по материалу, по типу процесса или его параметрам;

3 – окно свойств, в котором вводятся параметры процесса, допуск и настройки визуализации;

4 – «фильтр» по текстовому шаблону. Инструменты фильтрации позволяют быстро выделить в списке необходимые технологические процессы.

Виртуальные прототипы и отладка технологии

Инструменты FABViewer и CSViewer, объединенные в Intellisense, обеспечивают проверку правильности технологического маршрута с помощью двухмерных и трехмерных виртуальных моделей структур МЭМС, формируемых на различных этапах изготовления (рис. 5.26).

Базы данных материалов (MEMaterial)

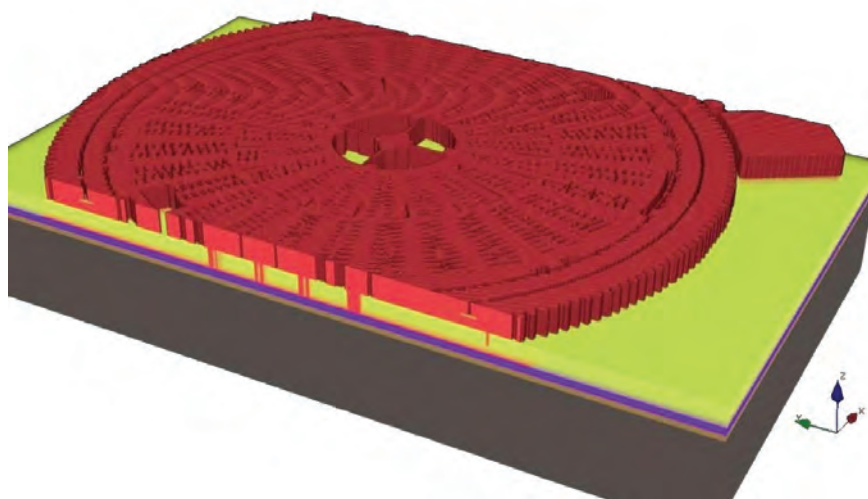
Инструмент MEMaterial предназначен для работы с базами данных тонких слоев и оптимизации процессов их обработки. MEMaterial содержит обширную базу данных тонких пленок. Она охватывает более семидесяти технологических процессов, разработанных для тонких слоев. MEMaterial связывает свойства тонких пленок с параметрами процесса.

На рис. 5.27 показано рабочее окно MEMaterial, содержащее информацию о тонкой пленке Si_3N_4 , полученной методом PECVD с использованием аргона в качестве газа-носителя. Свойства материала (механическое напряжение, плотность, коэффициент температурного расширения, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент преломления) показаны как функции технологических параметров (температура, давление, величина потока, ВЧ-мощность, парциальное давление газов).

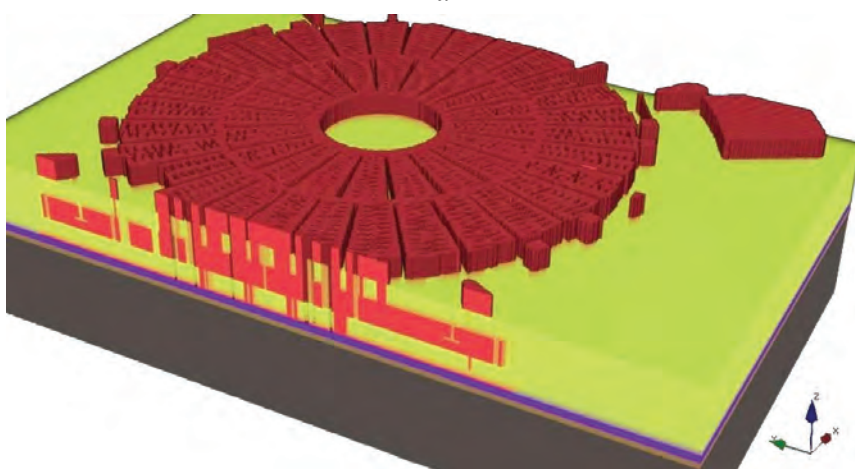
На рисунке цифрами отмечены следующие рабочие области окна MEMaterial:

1 – окно для создания базы данных свойств материалов или работы с существующей базой;

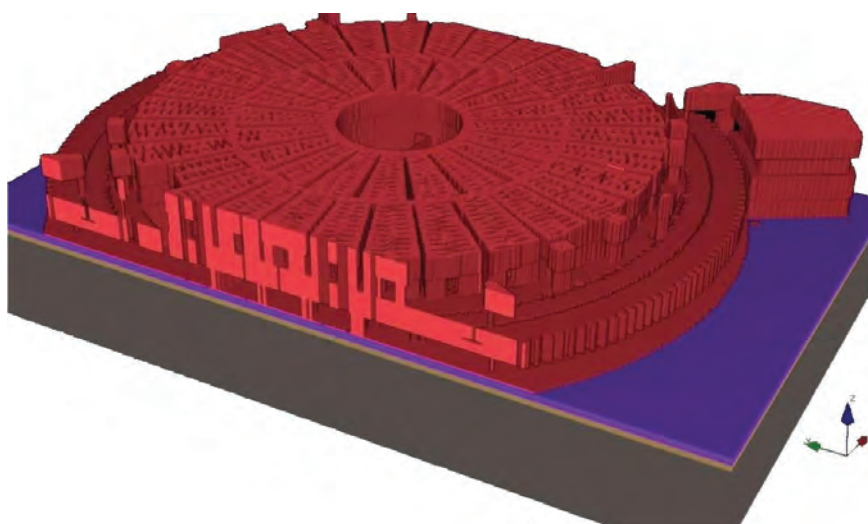
2 – окно результатов анализа, автоматически создаваемых MEMaterial с помощью алгоритмов многомерной обработки данных;



a



б



в

Рис. 5.26. Виртуальные модели для разных этапов процесса изготовления вибрационного двигателя с использованием технологического процесса Sandia Summit-V: *a* – сформированы первый жертвенный и первый структурный слой; *б* – получен второй структурный слой; *в* – сформирован третий структурный слой, удалены жертвенные слои

3 – окно исследования зависимости свойств материалов от заданных переменных;

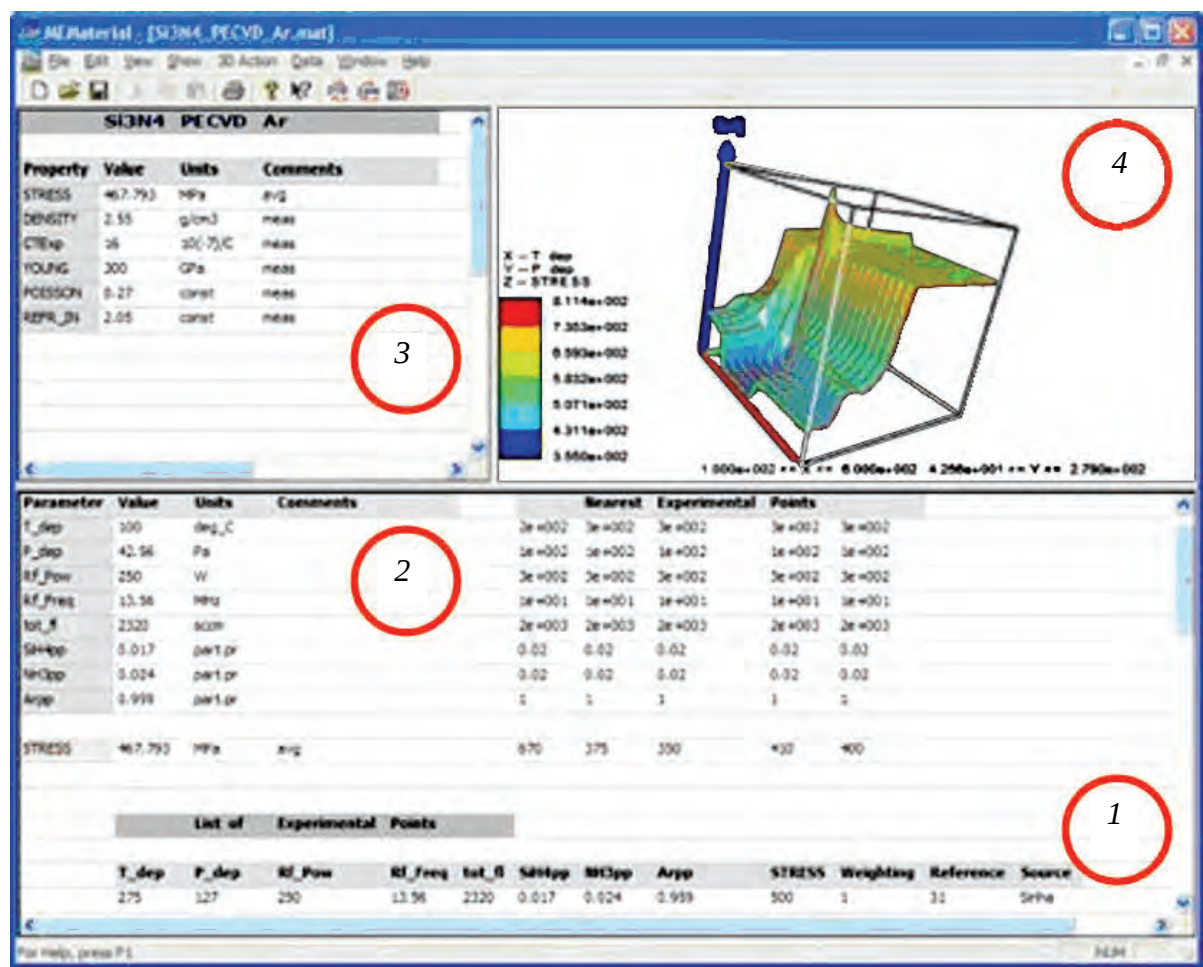


Рис. 5.27. Рабочее окно инструмента MEMaterial: 1 – окно работы с базами материалов; 2 – окно результатов анализа; 3 – окно исследования; 4 – графическое окно

4 – окно визуализации. Алгоритмы визуализации позволяют построить зависимость любого параметра материала от заданной переменной величины.

Автоматизированное проектирование технологии (TCAD)

Микроструктура моделируется на уровне технологического процесса. Симуляторы типа AnisE, IntelliEtch и RECIPE от IntelliSense и произведенные на базе SUPREM симуляторы других фирм-разработчиков выполняют моделирование реального технологического процесса, основываясь на его параметрах и физическом описании таких явлений, как диффузия, нанесение материала или травление.

Эти модели полезны для понимания результатов влияния технологического процесса на окончательную геометрию устройства. Так как они базируются на физических моделях, расчеты обычно являются очень затратными по времени. Например, инструмент RECIPE для моделирования реактивного ионного травления базируется на фактическом моделировании процессов плазменного травления и осаждения полимера.

Анизотропное травление (AnisE)

Инструмент AnisE предназначен для моделирования химического анизотропного травления кремния (рис. 5.28).

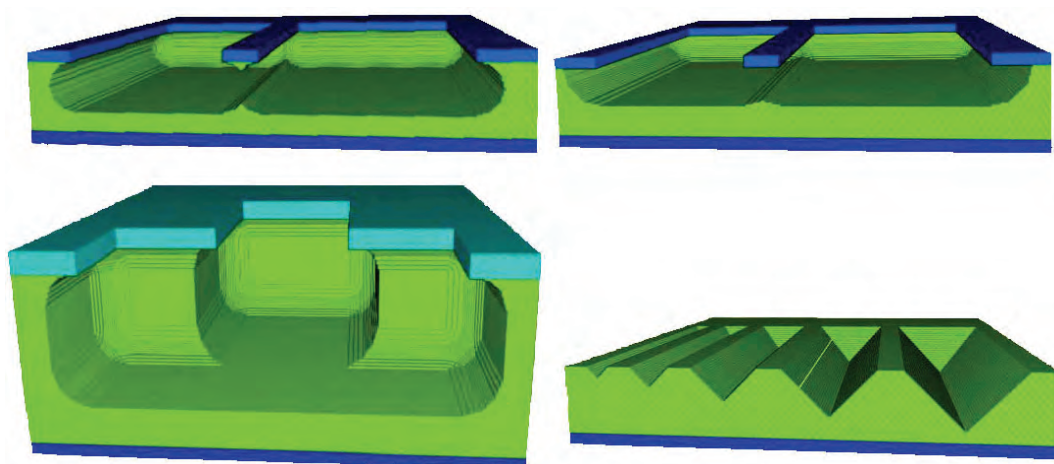
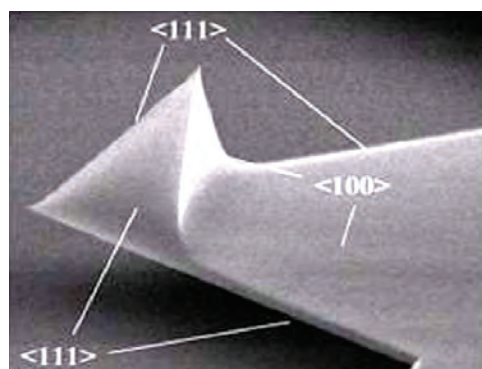
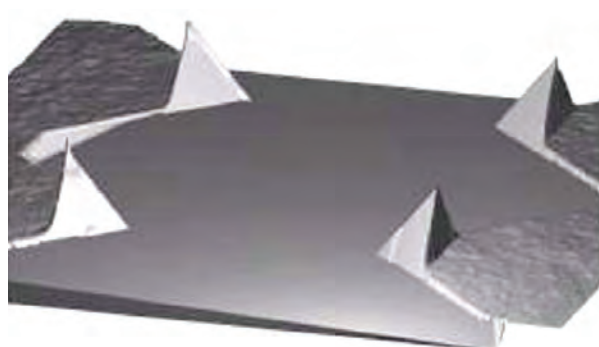


Рис. 5.28. Результаты моделирования травления кремниевых структур в AnisE



a



б

Рис. 5.29. Моделирование анизотропного травления:

a – микрофотография зонда (D. Saya, Sensors & Actuators A95, 2002);

б – результаты моделирования в пакете IntelliSuite

Для построения модели в AnisE необходимо задать ряд параметров: маски травления и нанесения материала, ориентацию подложки и характеристики процесса.

AnisE используется для моделирования травления KOH/ТМАН/Dry, для ориентации подложки $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$, для выполнения исследования вариаций процесса, а также для моделирования процесса с многократным нанесением материала и травлением (рис. 5.29).

Атомистический симулятор травления IntelliEtch

Моделирование микроструктур исходно базируется на атомистических или квантово-механических молекулярных описаниях. Последние обычно полезны для предсказания свойств материалов или явлений в структурах нанометрового диапазона. В то время как объем исследований в этой области непрерывно расширяется, только немногие инструменты обеспечивают подобное моделирование для разработчиков МЭМС. Один из таких инструментов – IntelliEtch IntelliSense, который использует атомистические принципы для моделирования процесса травления кремния (рис. 5.30).

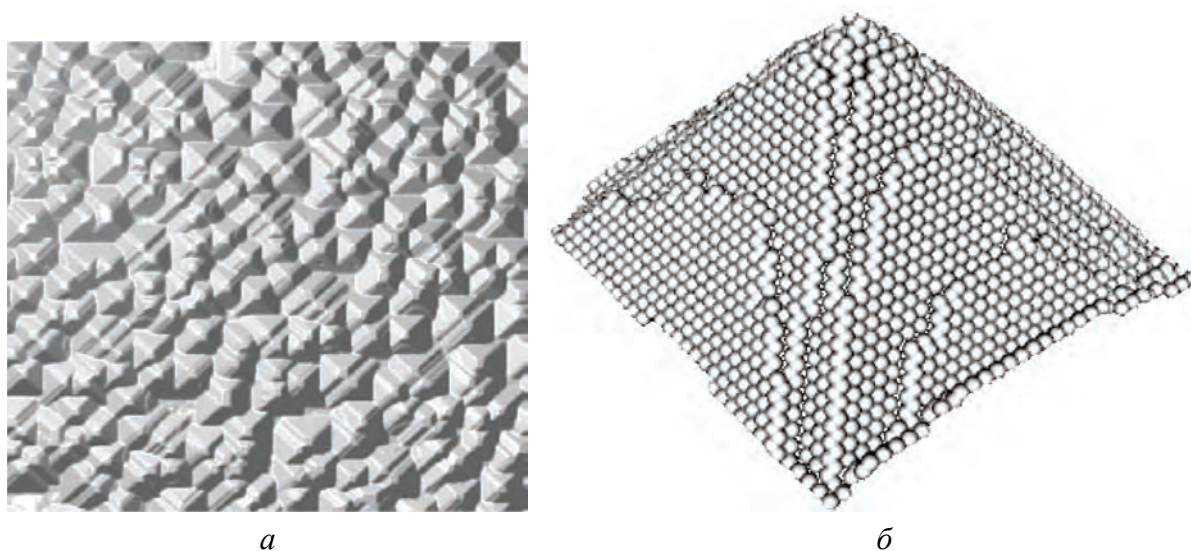


Рис. 5.30. Моделирование травления в IntelliEtch: *а* – морфология поверхности с пирамидальными образованиями для кремния $\langle 100 \rangle$, подвергнувшегося химическому анизотропному травлению; *б* – результаты симуляции образования пирамидальной структуры

Атомистические модели используют, чтобы предсказать формирование выступов и поверхностную морфологию в ходе химического травления кремния. Эти методы позволяют учесть эффекты микромаскирования, которые препятствуют гладкому травлению.

Тестирование инструментов CleanRoom в сравнении с экспериментальными исследованиями технологических процессов показывают корректность результатов моделирования (рис. 5.31).

Достаточно простой в управлении интерфейс IntelliEtch в значительной степени облегчает работу разработчика (рис. 5.32).

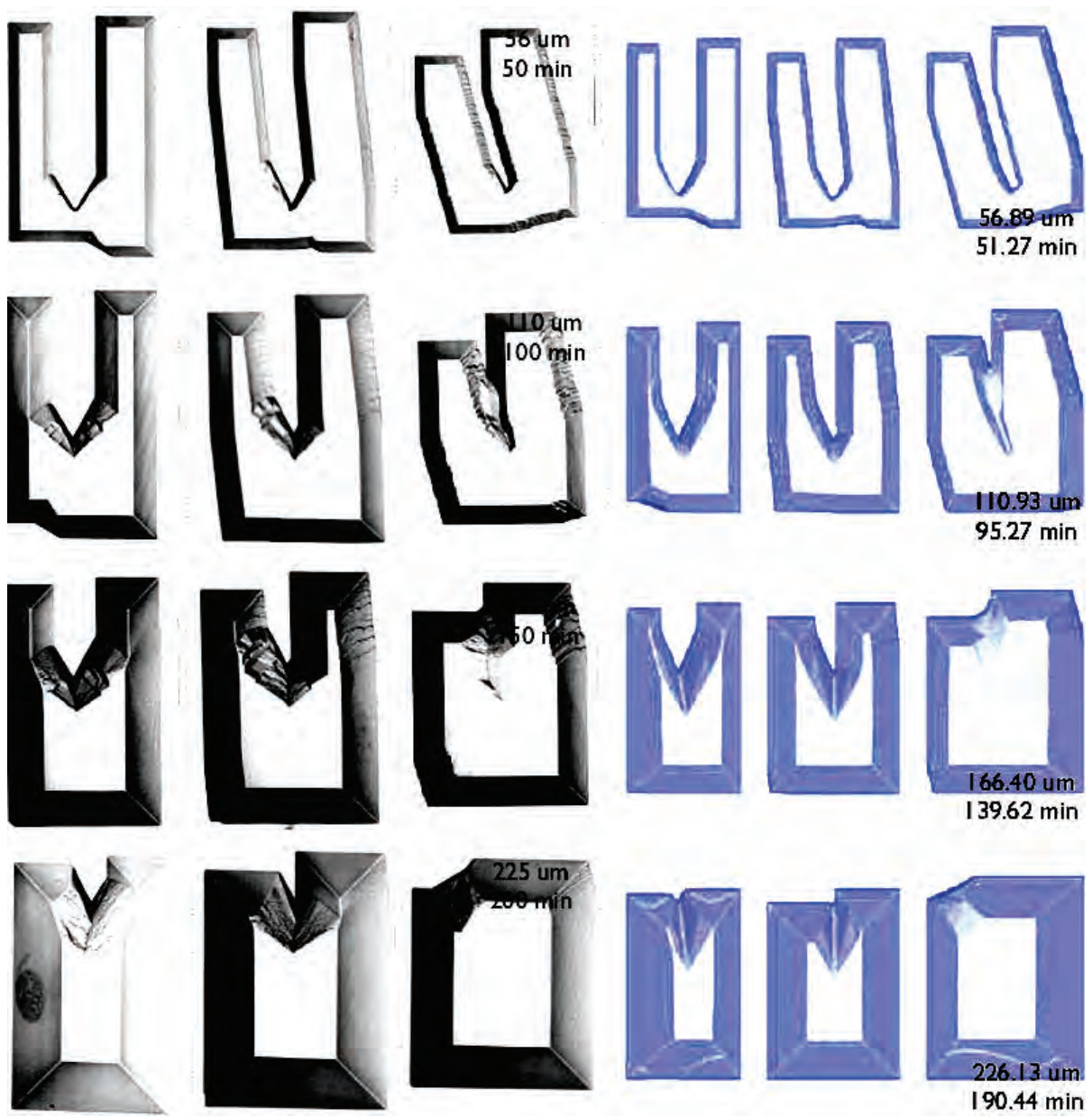


Рис. 5.31. Тестирование инструментов симуляции травления Clean Roome: три столбца микрофотографий слева – эксперимент; три столбца изображений справа – моделирование

RECIPE – средство моделирования реактивного ионного травления

С помощью инструмента RECIPE на основе заданной топологии может быть автоматически выполнено моделирование изотропного травления микроструктуры МЭМС/НЭМС, реактивного ионного травления, травле-

ния с использованием ВЧ возбуждения индукционно связанной плазмы (Inductive Coupled Plasma Source – ICP) травления, а также любая комбинация этих трех процессов.

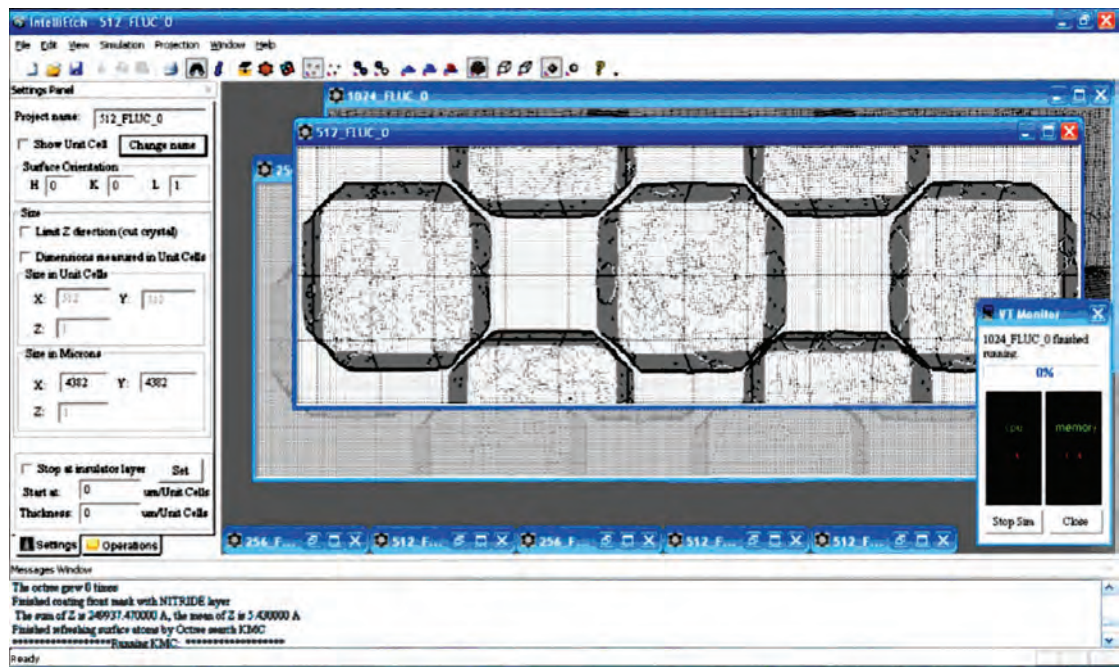


Рис. 5.32. Интерфейс инструмента IntelliEtch

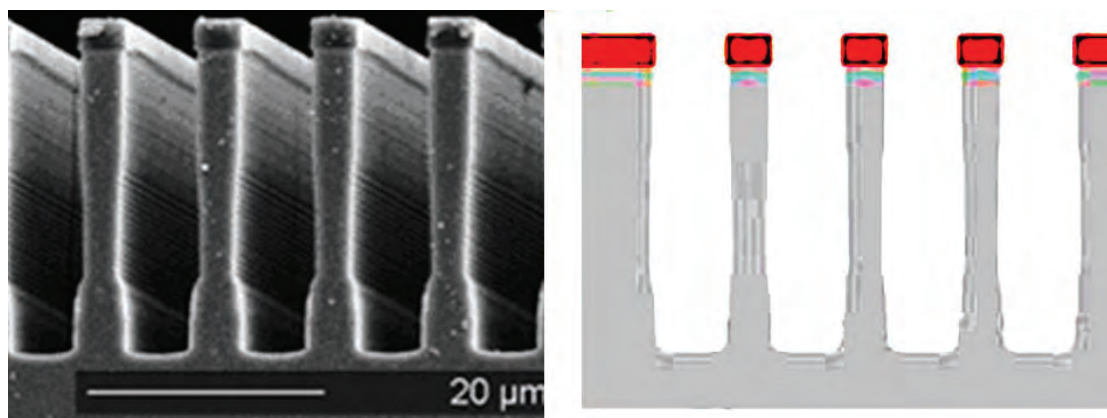
RECIPE позволяет также выполнять моделирование многошагового травления (например, изотропное травление), сопровождаемое глубоким реактивным ионным травлением (Deep Reactive Ion Etching – DRIE), выполняемым во фтор- и хлорсодержащих плазмах.

Ниже приведены примеры сравнения микрофотографий реальных кремниевых микроструктур, содержащих канавки шириной 5 мкм с высоким аспектным соотношением, и соответствующих им сечений виртуальных моделей, полученных с помощью RECIPE (рис. 5.33).

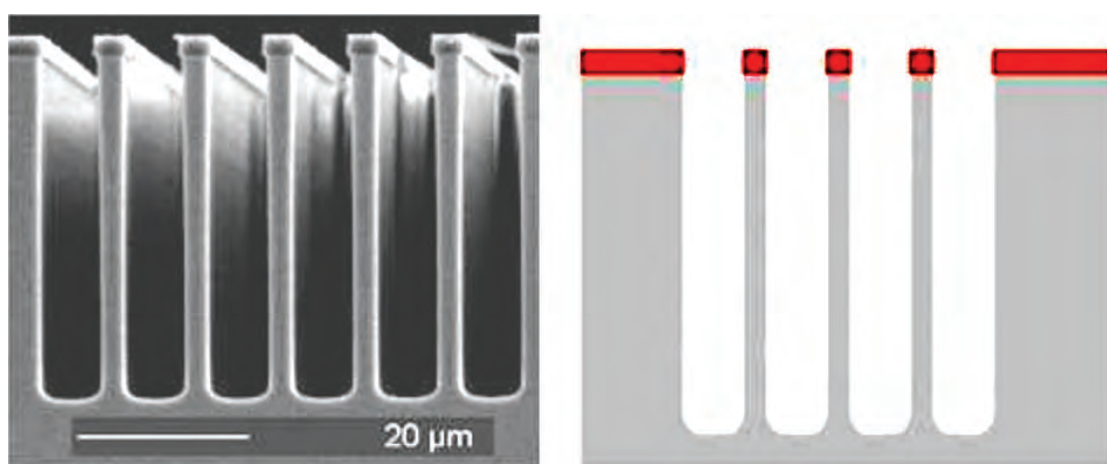
Настройка угла боковой стены является важным фактором для достижения требуемых параметров многих классов устройств МЭМС.

Экспериментальные образцы были получены с использованием трех шагов травления с различными отношениями продолжительности травления и выполнения защитной полимеризации последовательно, для каждой из структур в течение 5 минут.

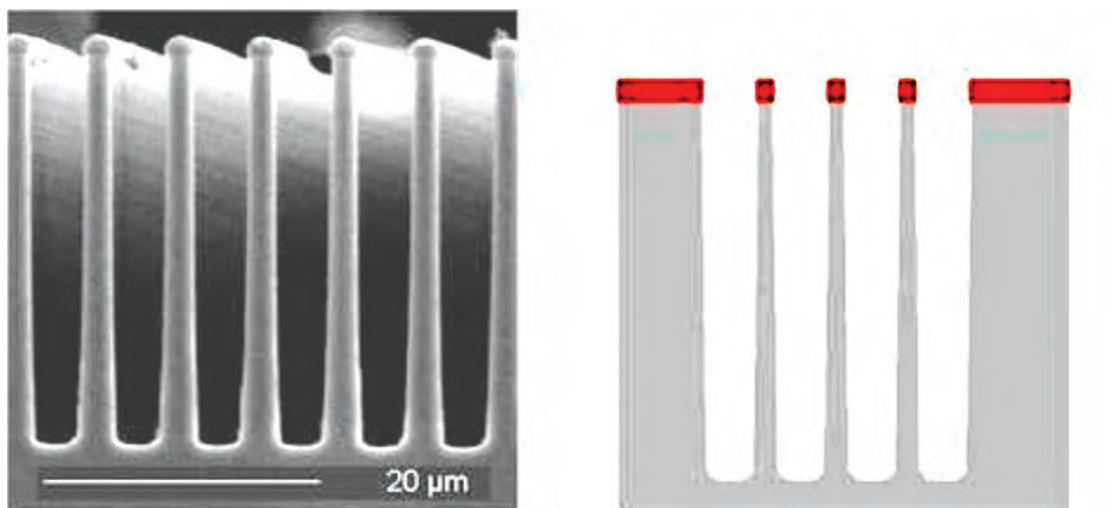
Инструменты CleanRoom позволяют моделировать сложные технологические маршруты. Примеры структур для технологического маршрута, включающего многошаговое использование масок, работу с оксидными или нитридными слоями, осаждение жертвенного слоя, химическое травление и процессы DRIE, показаны на рис. 5.34.



a



б



в

Рис. 5.33. Сравнение экспериментальных микроструктур (слева) и сечений, полученных моделированием в RECIPE (справа): *a* – для отношения продолжительности операция травления 9 с и полимеризации 7 с; *б* – 7 с и 7 с соответственно; *в* – 5 с и 7 с

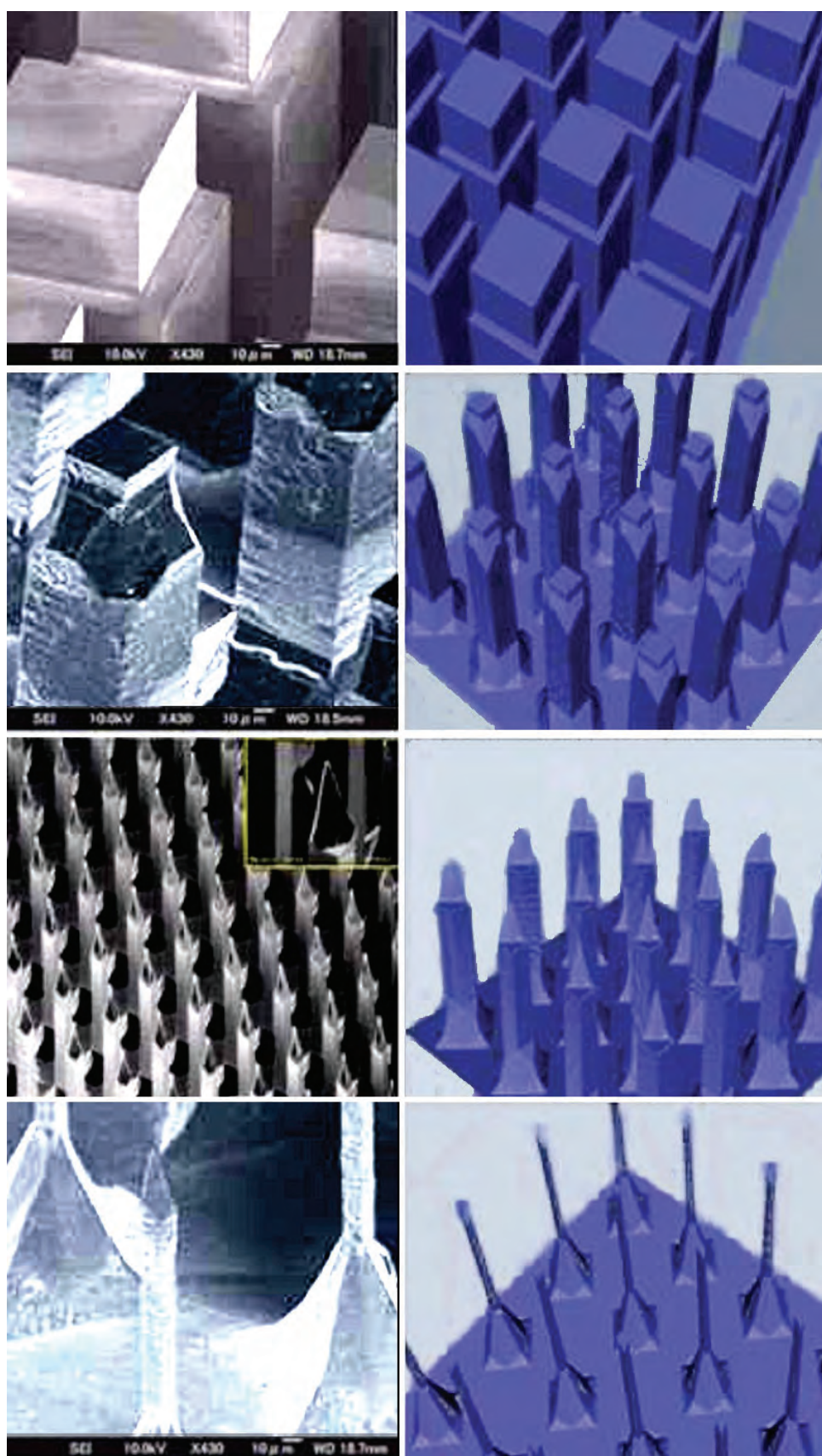


Рис. 5.34. Моделирование формирования микроигл в Clean Room: слева – эксперимент; справа – компьютерное моделирование

Отладка процесса обработки с помощью RECIPE-3D позволяет настроить технологический маршрут для глубокой обработки кремния. В показанном ниже примере сформировано устройство, содержащее гребенчатую структуру с использованием процесса SCREAM (Single Crystal Reactive Etching and Metallization – реактивное травление и нанесение металлизации).

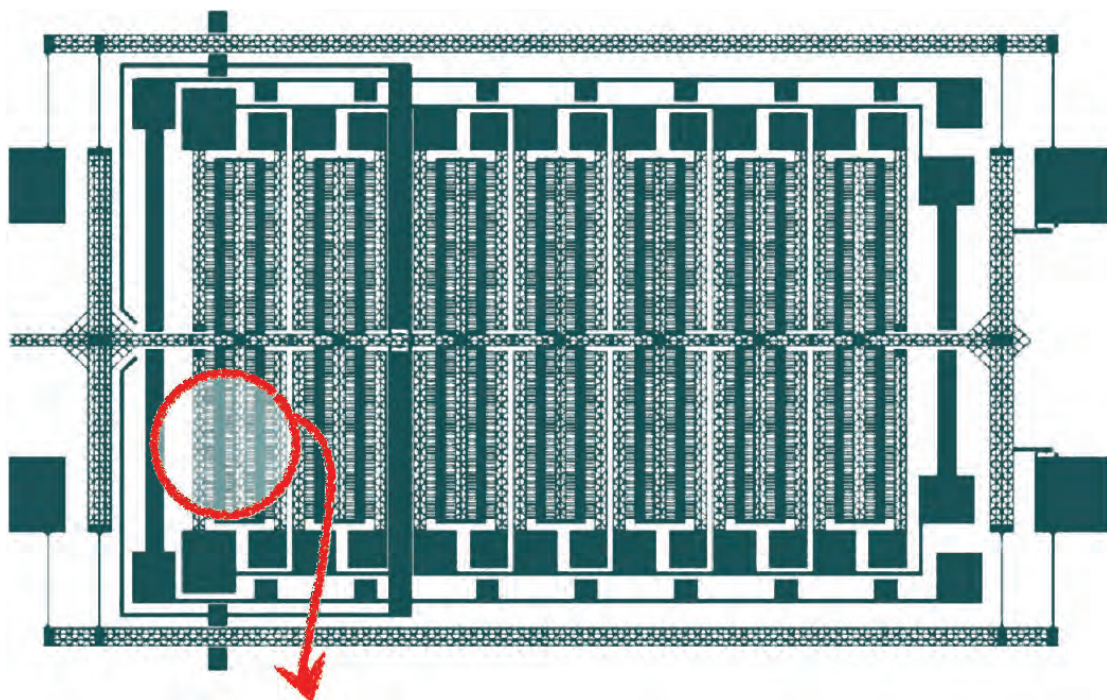


Рис. 5.35. Общий вид топологии устройства с гребенчатой структурой

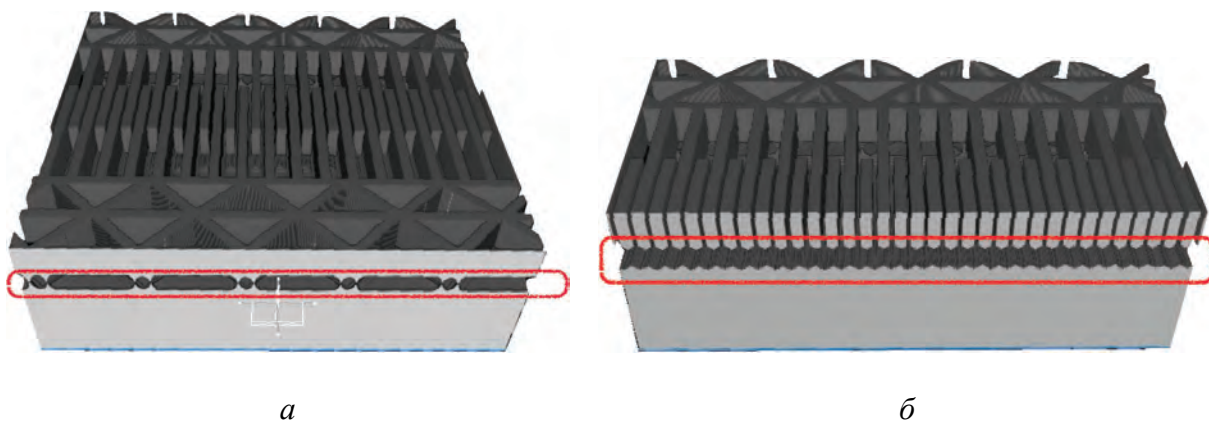


Рис. 5.36. Моделирование вида структуры: *а* – нереализованные области; *б* – реализованная гребенчатая структура

Моделирование позволяет определить нереализуемые и реализуемые при травлении области. Полученные результаты указывают на то, что топология будет нуждаться в некоторых дополнительных коррективах до начала производства (рис. 5.35, 5.36).

Следует отметить, что на практике возможны значительные отличия результатов моделирования от эксперимента. Для минимизации этих отличий предусмотрена простая методология калибровки моделей RECIPE.

5.6. Физическое моделирование

Физическое моделирование в пакете IntelliSuite выполняется с помощью набора инструментов, объединенных в ряд модулей. В табл. 5.6 представлены эти инструменты и дана их краткая характеристика.

Таблица 5.6

Функции модуля *Multiphysics*

Функция		Основные возможности
	Многодисциплинарный физический анализ (Fastfield Multiphysics)	Оригинальные алгоритмы, основанные на методах конечных и граничных элементов, обеспечивают многократное сокращение времени расчетов по сравнению с традиционным конечно-элементным моделированием
	Связанный анализ	Тепловые эффекты Механика Контактные задачи Микро-гидроаэродинамика Электростатика Пьезоэлектрический эффект Магнитостатика
	Специализированные инструменты	Био-МЭМС (BioMEMS) Высокочастотный электромагнитный анализ (EMag)
	Экстракция модели	Формирование многодисциплинарной модели Повышение эффективности верификации Использование описания Лагранжа

Моделирование МЭМС обязательно является многодисциплинарным по своему характеру. На рис. 5.37 на примере вибрационного микродвигателя показаны виды физических дисциплин, которые должны участвовать в моделировании.

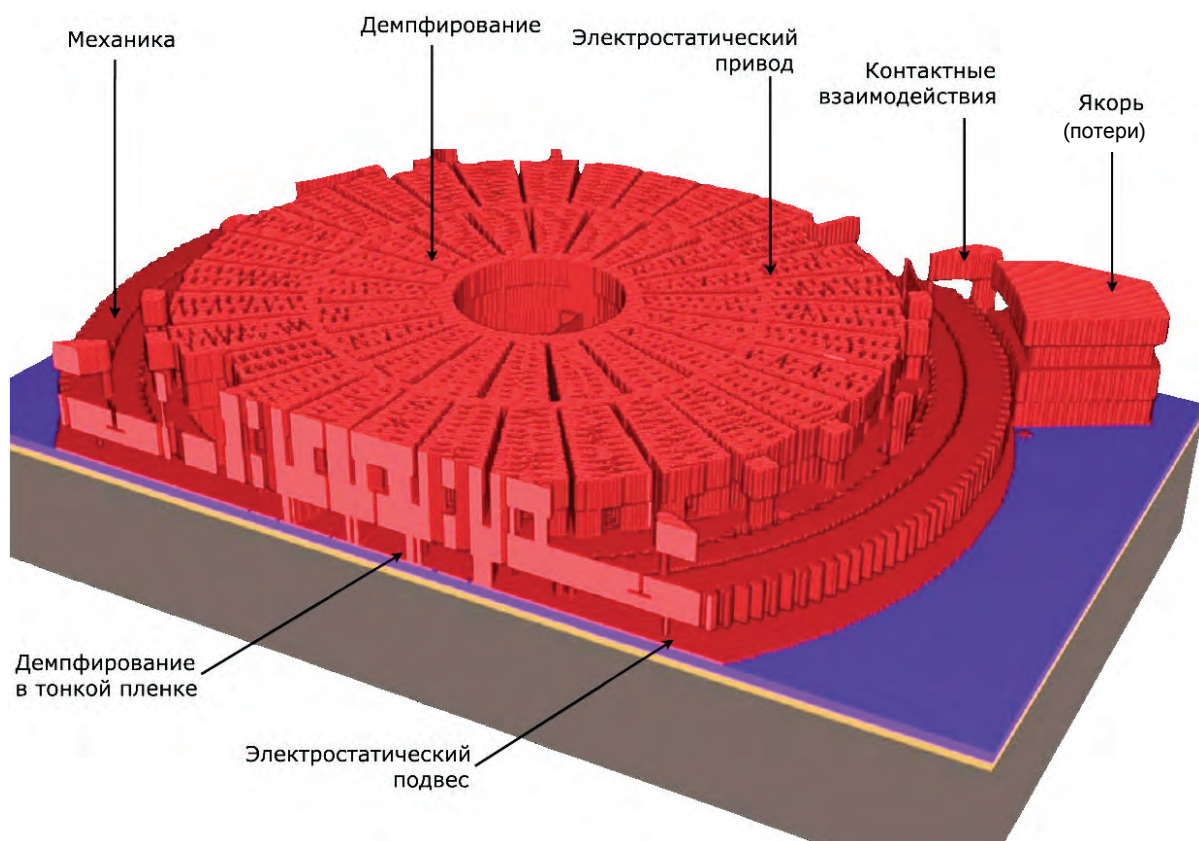


Рис. 5.37. Физические эффекты, учитываемые при проектировании МЭМС на примере микродвигателя с электростатическим приводом

Как правило, для описания физических процессов в устройствах МЭМС используются методы конечных и граничных элементов. Fastfield Multiphysic в отличие от известных программных средств, таких как Ansys, Comsol и ряда других, не является конечно-элементным инструментом моделирования в чистом виде. В пакете IntelliSuite используется смешанная формулировка, которая объединяет конечно-элементное моделирование с другими численными методами, оптимизированными для прикладных областей. Например, для расчета электростатических полей или высокочастотного импеданса используется формулировка метода граничных элементов.

Ниже приведены виды решателей и области физического моделирования, для которых их предпочтительнее использовать.

Метод граничных элементов – электростатика, определение импеданса.

Метод конечных элементов – тепловые, механические, высокочастотные электромагнитные процессы.

Метод Volume of Flow/Fluid (VoF) и метод конечных объемов (Finite Volume Method – FVM) – гидроаэродинамика, электрокинетические расчеты, химические реакции.

Метод отображений Шварца-Кристоффеля (Schwartz-Christoffel Mapping) – двумерная электростатика (SYNPLE).

Алгоритмы отслеживания поверхности (Surface Tracking Algorithms) – дискретная микрофлюидика.

Модифицированный метод Рэлея (Quick Rayleigh Solver) – гидродинамическое демпфирование.

Преимущества технологии моделирования Fastfield Multiphysics заключаются в сокращении объема решаемых задач, уменьшении времени расчета. Применение метода граничных элементов позволяет существенно экономить ресурсы компьютера при работе с сетками в неоднородных структурах. Для многих задач Fastfield вычисляет результат в 2–10 раз быстрее по сравнению с традиционным конечно-элементным анализом. При этом Fastfield Multiphysics поддерживает работу с 64 разрядными многоядерными процессорами в соответствии с современными вычислительными тенденциями.

Термоэлектромеханический анализ

Термоэлектромеханический (Thermo-Electro-Mechanical – TEM) аналитический модуль позволяет выполнять связанный тепловой, электрический и электростатический, магнитостатический, гидродинамический и механический анализ (рис. 5.38).

Модуль TEM обеспечивает проведение статического, динамического, гармонического, переходного анализа, а также исследование механических контактных взаимодействий и постконтактных явлений для линейных или нелинейных систем.

Модуль TEM, основанный на традиционной версии нелинейного конечно-элементного решателя ABAQUS, позволяет решать сложные существенно нелинейные задачи. TEM включает множество традиционных для МЭМС алгоритмов, превосходящих неспециализированные инструменты.

К преимуществам аналитического модуля TEM относятся следующие.

- Полноценный динамический анализ в отличие от других инструментов, использующих квазистатическое приближение.
- Связь сеточного разбиения поверхностей и объемов. Не требуется построения сетки в воздушных зазорах. Разделение сеток для механических и электрических моделей позволяет решать большие по объему задачи.
- Моделирование взаимодействия жидкой среды (Fluid Structure Interaction – FSI) для вычислений электромеханических и пьезоэлектрических процессов, демпфирования с использованием экстракции.

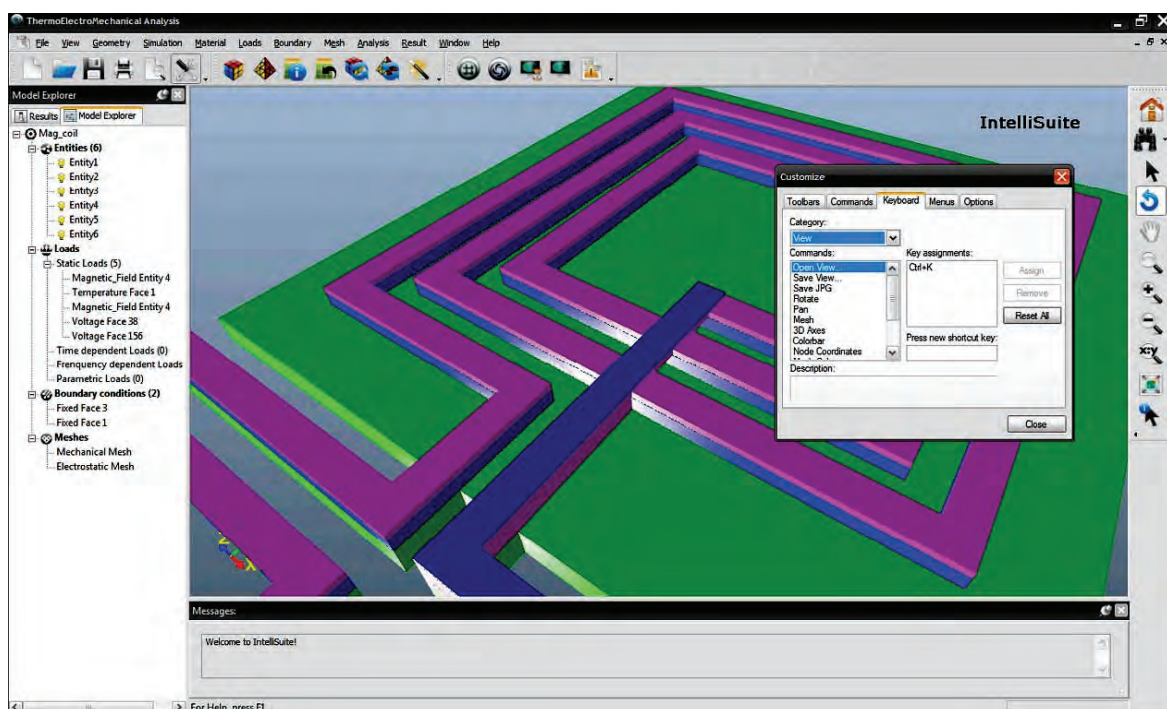


Рис. 5.38. Рабочее окно модуля ТЕМ

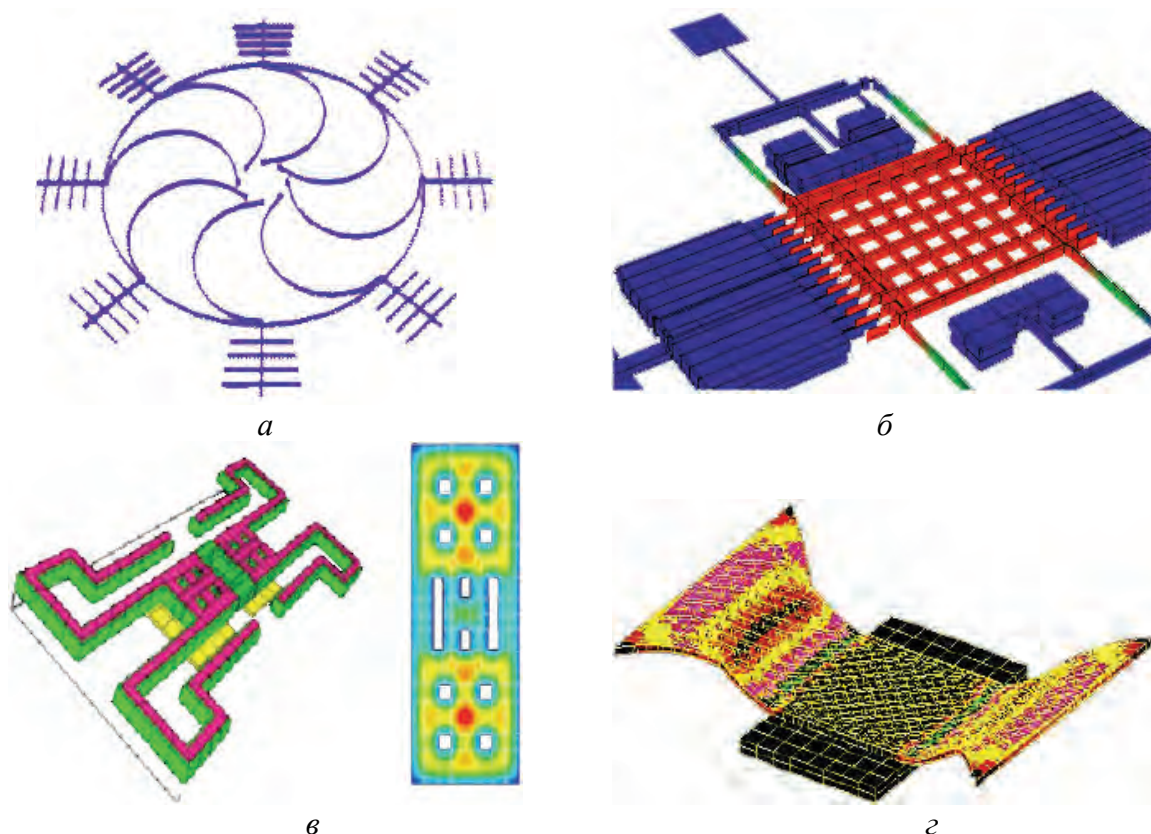


Рис. 5.39. Расчетные модели в модуле ТЕМ: *а* – кольцевой гироскоп, количественная оценка эффекта Кориолиса; *б* – вибрационный гироскоп Draper Laboratory, расчет электростатического привода; *в* – инерционное устройство Lockheed, микрогидроаэродинамический анализ; *г* – СВЧ переключатель Raytheon/TI, нелинейный контактный анализ

Модуль оптимизации расчета микрогидроаэродинамического демпфирования для моделирования взаимодействия жидкой структуры обеспечивает ускорение вычислений более чем на порядок по сравнению с обычным решателем, основанным на модели Навье – Стокса.

На рис. 5.39 и 5.40 показаны характерные примеры моделирования связанных процессов в структурах МЭМС.

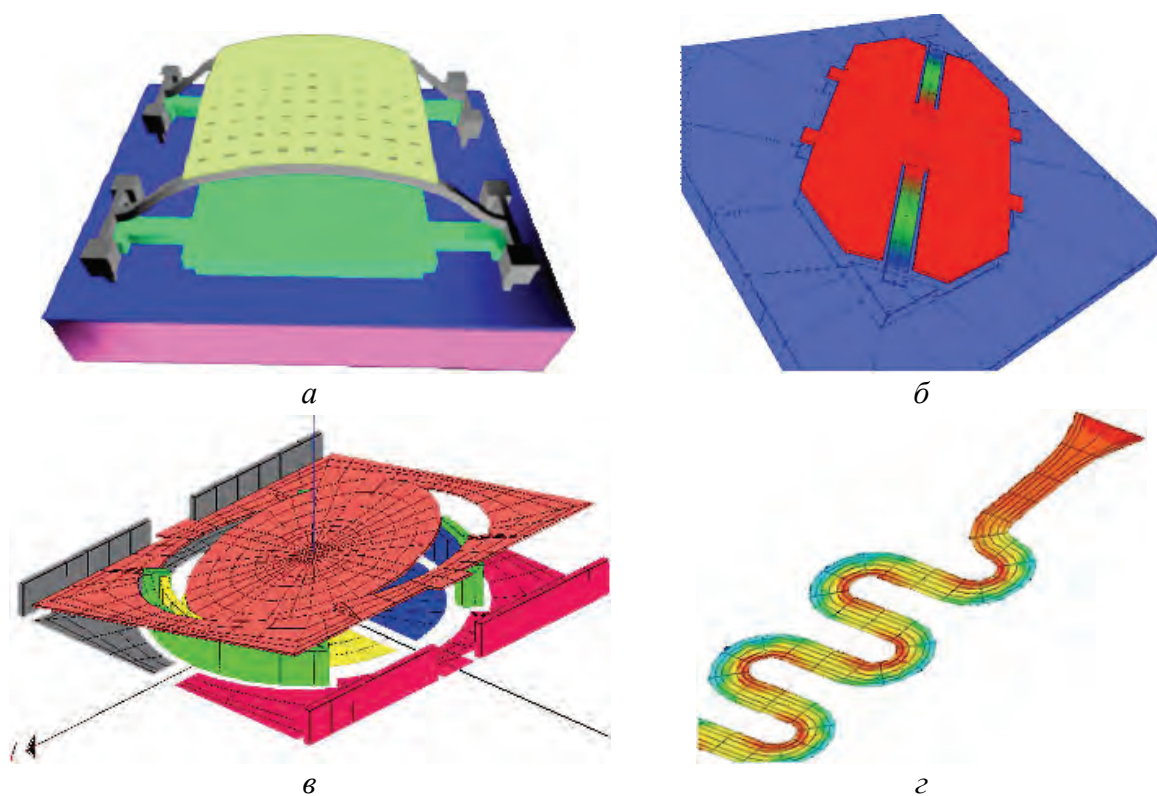


Рис. 5.40. Расчетные модели в модуле TEM: *а* – высокочастотный пере-страиваемый фильтр Hitachi; *б* – адаптивное оптическое устройство NASA; *в* – оптическое кросс-соединение Corning; *г* – детектор излучения NASA

Следует подчеркнуть, что анализ контактных взаимодействий в IntelliSuite выполняется без уменьшения порядка моделей и других существенных упрощений, что позволяет рассчитывать сложные контактные и постконтактные явления, такие как гистерезис.

Моделирование пьезоэлектрических и пьезорезистивного эффектов

Модуль TEM полностью интегрирован с модулем PiezoMEMS IntelliSuite, предназначенным для анализа структур с использованием пьезоэлектрического или пьезорезистивного эффекта. Примеры результатов пьезоакустического анализа представлены на рис. 5.41, 5.42.

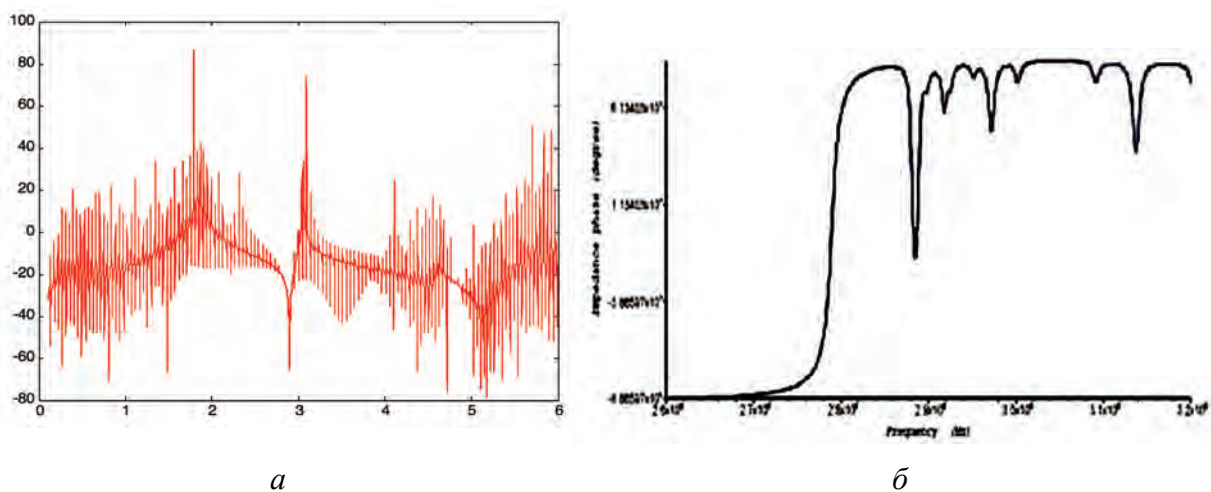


Рис. 5.41. Моделирование объемных и поверхностных акустических волн:
а – определение импеданса; *б* – фазовая пульсация в устройстве на объемных акустических волнах

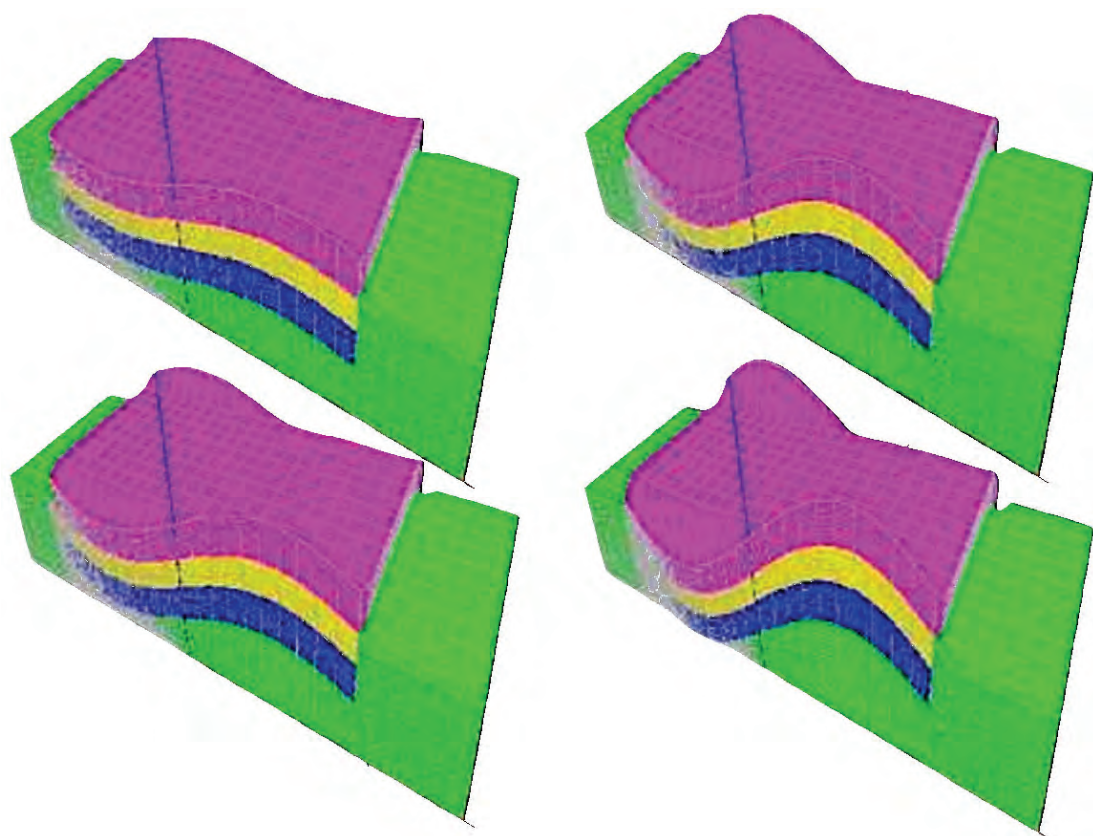


Рис. 5.42. Возбуждение акустических волн
 в пьезоэлектрической структуре

Модуль PiezoMEMS позволяет исследовать элементы пьезопроводов и пьезодатчиков МЭМС, рассчитывать частотные характеристики устройств, определять добротность, выполнять другие вычисления.

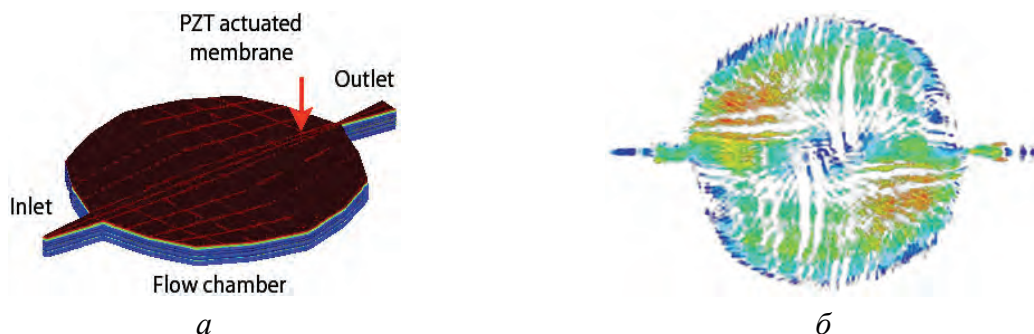


Рис. 5.43. Моделирование пьезоэлектрического микронасоса:
a – конструкция насоса; *б* – результаты расчета колебаний мембраны

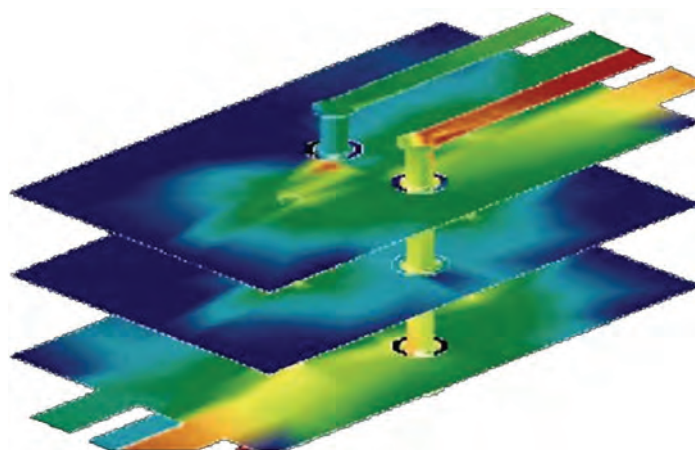


Рис. 5.44. Анализ многослойной
 металло-диэлектрической структуры в модуле EMag

Технология Fastfield поддерживает описание взаимодействия жидкой среды (FSI – fluid structure interaction) для электромеханических и пьезоэлектрических моделей, а также для расчета демпфирования. Возможности FSI прошли тестирование для многих приложений от конденсаторных микрофонов до микронасосов (рис. 5.43) с пьезоэлектрическим приводом и других структур МЭМС.

Высокочастотный электромагнитный анализ

Модуль электромагнитного анализа EMag пакета IntelliSuite предназначен для исследования высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) МЭМС, оптических МЭМС. Модуль EMag основан на методе конечных элементов.

Этот модуль разработан специально для МЭМС и позволяет моделировать трехмерные структуры с высоким аспектным отношением (рис. 5.44) в отличие от традиционных инструментов ВЧ анализа, предназначенных для планарных или квазипланарных структур.

EMag обеспечивает создание и анализ сложных геометрических моделей, включающих переходные отверстия и перфорацию проводников. Функциональные возможности электромагнитного модуля расширены за счет учета потерь в проводниках и зазоров в диэлектриках. Реализованы алгоритмы определения импеданса и других параметров многополюсников.

Модуль EMag обеспечивает совместно с модулем TEM связанный анализ ВЧ устройств МЭМС.

Связанный анализ, включающий электромагнитные процессы

Аналитический модуль TEM в сочетании с инструментом EMag, встроенным в пакет IntelliSuite, обеспечивает проведение связанного термоэлектромеханического и ВЧ электромагнитного анализа. Это особенно полезно при разработке деформируемых ВЧ МЭМС, таких как переключатели и перестраиваемые конденсаторы. Кроме того IntelliSuite обеспечивает возможность проведения ряда других специальных видов моделирования, в частности, исследование эффекта динамического закрытия переключателей, содержащие моделирование обратного переключения.

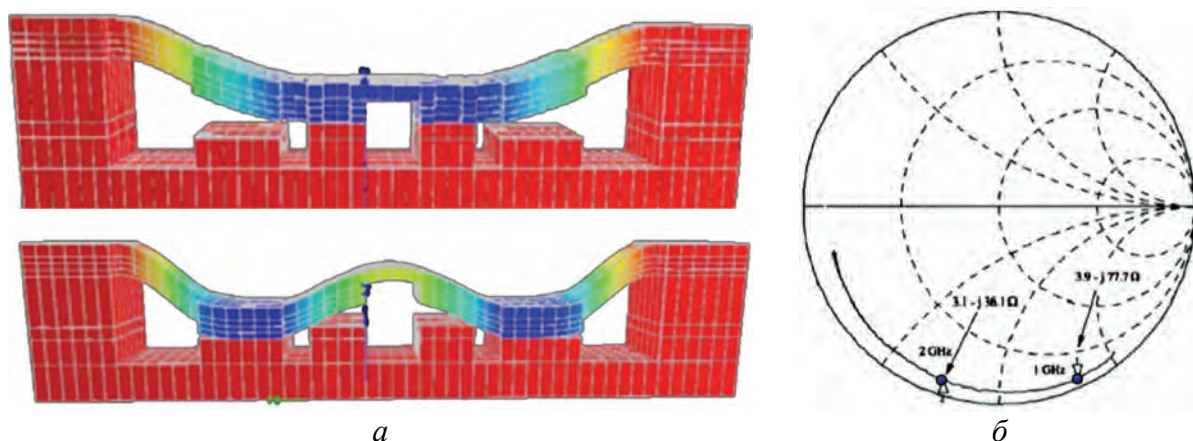


Рис. 5.45. Связанный анализ, включающий высокочастотные электромагнитные процессы: *а* – модель СВЧ микромеханического переключателя; *б* – расчет импеданса

На рис. 5.45 приведен пример моделирования СВЧ микромеханического коммутатора с электростатическим управлением. В данной модели присутствует электростатическое и механическое взаимодействие, а также высокочастотный электромагнитный анализ.

**Микрогидроаэродинамика (микрофлюидика)
и анализ био-МЭМС**

IntelliSuite включает инструмент трехмерного моделирования уравнения Навье–Стокса, оптимизированный для микрогидроаэродинамических приложений. Одновременно, в отличие от известных инструментов вычислительной гидроаэродинамики (CFD), добавлена поддержка электрокинетических явлений, окислительно-восстановительных реакций, кислот, оснований, амфолитов и процессов взаимодействия жидкой структуры (рис. 5.46).

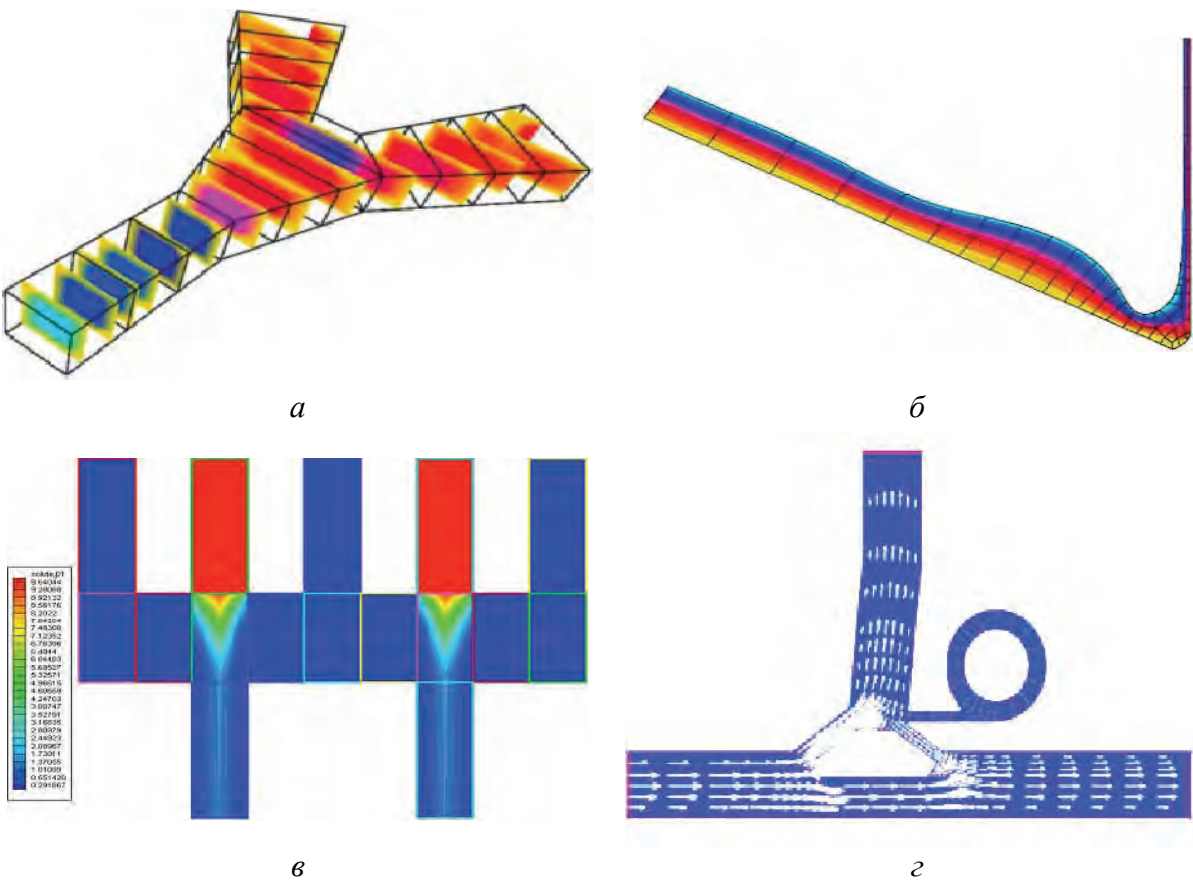


Рис. 5.46. Микрогидродинамическое моделирование в пакете IntelliSuite: *а* – смешивание потоков в Y-образном канале; *б* – поток со свободной границей; *в* – электрокинетическое мультиплексное фокусирование; *з* – электрофоретическое / диэлектрофоретическое высокочастотное разделение

Оптимизированный инструмент анализа электросмачивания на диэлектрике (ElectroWetting on Dielectric – EWOD) позволяет оперативно моделировать транспорт капли жидкости, ее объединение и разделение (рис. 5.47).

Пакет поддерживает усовершенствованные алгоритмы визуализации для получения поперечных сечений, полей скоростей, линий потока и результатов расчета переходных процессов.

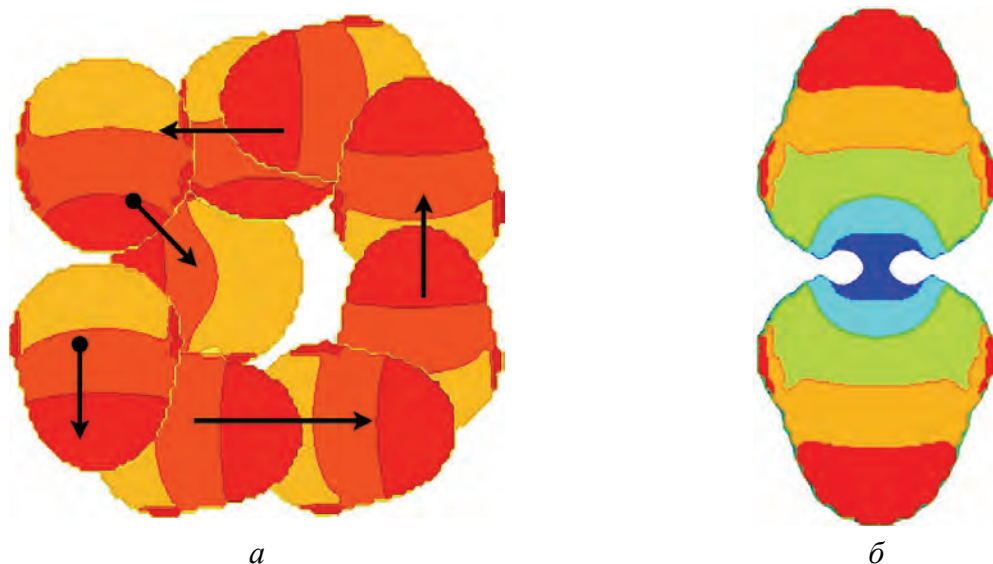


Рис. 5.47. Моделирование движения капель: *а* – перемещение капель по намеченной траектории; *б* – трансформация капли (вид сверху)

По сравнению с другими программными средствами IntelliSuite обеспечивает меньшее время вычислений при решении задач микрогидроаэродинамики, позволяет решать специальные задачи в пределах от высокочастотного диэлектрофореза до изоэлектрического фокусирования и расчета электроосмотического потока.

Анализ влияния корпуса и подложки

Большинство устройств МЭМС представляют собой входные и выходные элементы, для которых необходим внешний электрический интерфейс и управляющая электроника. Использование структуры МЭМС предполагает ее установку в корпус, обеспечивающий защиту и взаимодействие с электрической схемой на уровне специализированных интегральных микросхем (Application Specific Integrated Circuit – ASIC). Поэтому одной из важных задач в процессе разработки МЭМС является анализ влияния корпуса и подложки на работу устройства. К эффектам, требующим учета, относятся отличие температурных коэффициентов расширения материалов, эффекты влияния корпуса на ослабление сигнала, паразитные электромагнитные эффекты.

В настоящее время разработан ряд технологий корпусирования МЭМС. Вид корпуса устройства МЭМС определяется требованиями его

защиты от внешних факторов и стоимостью корпусирования. Технология корпусирования МЭМС аналогична принятой для интегральных схем (ИС), однако имеется и ряд отличий.

Получили распространение различные технологии монтажа устройств МЭМС: корпусирование на уровне пластины (Wafer-Level Packaging – WLP); 3D-корпусирование – корпус-на-корпусе (Package on Package – PoP), стекированные, или штабелированные чипы (3D stacking, stacked die, C2C), корпуса, созданные на уровне пластины в масштабе кристалла (Wafer-Level Chip-Scale Package – WLCSP), мультикристалльные модули (multi-chip module – MCM) и др.

Инструменты IntelliSuite обеспечивают соответствующие виды расчетов: расчет механических напряжений, перемещений, деформаций; анализ тепловых процессов, включая омический нагрев; вибрационный анализ; исследование влияния ударной нагрузки; демпфирование (рис. 5.48).

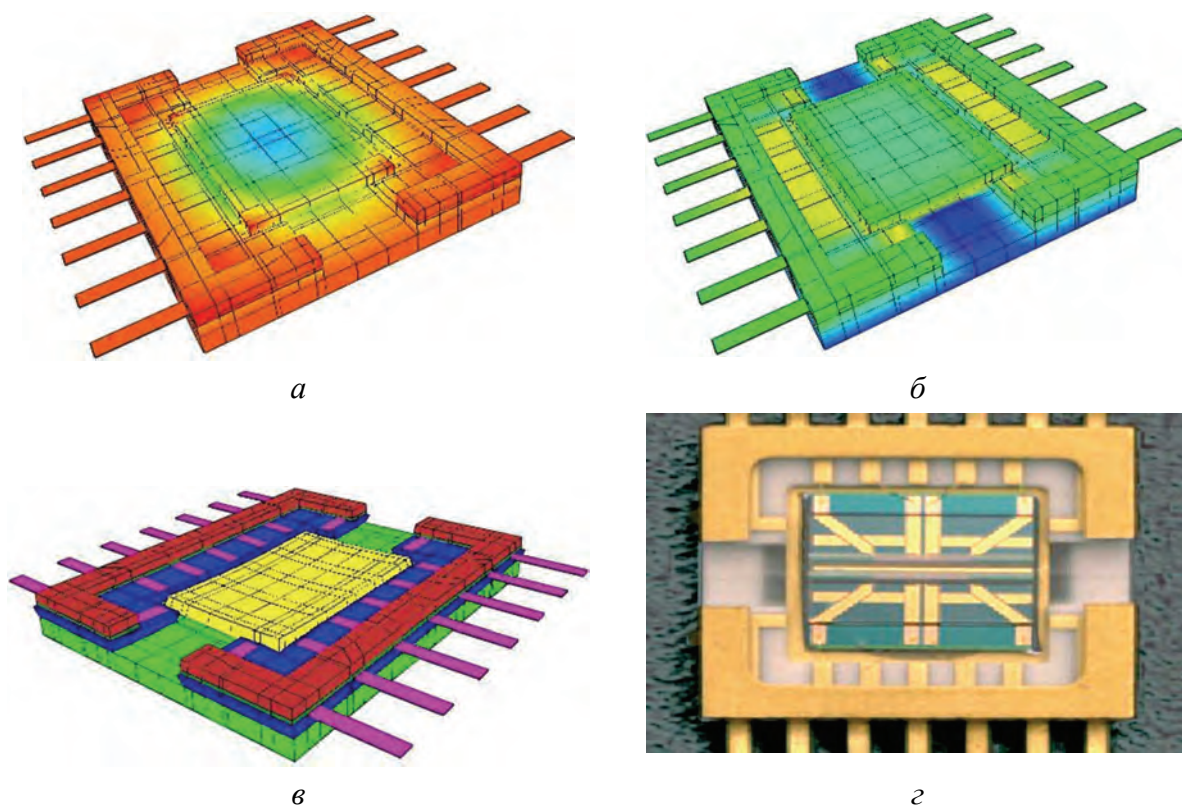


Рис. 5.48. Моделирование эффектов, связанных с корпусом, на примере микросхемы детектора Agilent Inc.: *а* – тепловой анализ; *б* – распределение механических напряжений; *в* – деформация корпуса; *г* – общий вид микросхемы

Процедура экстракции модели корпуса дает возможность определить действие механических напряжений корпуса на системном уровне и принять меры по компенсации влияния вызванных корпусом эффектов на ра-

бочие характеристики МЭМС. Последнее позволяет выполнить требование стандартов JEDEC, MIL-STD или тесты Belcore для устанавливаемых в корпус устройств до начала производства.

5.7. Экстракция и верификация моделей

Пакет IntelliSense включает инструмент экстракции системных моделей SME (System model extractor), предназначенный для понижения порядка сложности задачи и упрощения анализа МЭМС (рис. 5.49). Преобразование основанных на топологии численных трехмерных моделей в модели системного уровня позволяет существенно упростить исследование МЭМС. Типичные трехмерные модели МЭМС могут содержать от 10^5 до 10^6 степеней свободы, в то время как системные симуляторы не предназначены для работы с такими сложными задачами.

Многие разработчики используют упрощающие модельные приближения при моделировании системы. Это чрезвычайно облегчает рассмотрение реальных процессов типа эффектов травления, механического напряжения в стержнях и эффекта левитации подвижных электродов из-за электростатического отталкивания. Например, изменение угла наклона боковой стенки электрода из-за травления может привести к большим квадратурным ошибкам в инерционных устройствах. Остаточные напряжения в стержнях могут вызывать изменение характеристик стержней, а эффекты левитации в гребенчатых структурах могут быть причиной понижения чувствительности устройств.

Новый класс численных алгоритмов, основанных на методах сокращения подобластей Крылова–Арнольда, был развит в последние годы для преобразования численных моделей большой размерности в модели с произвольной степенью свободы (NDOF). Эти алгоритмы опираются на описание полной энергии и рассеяние энергии в системе. Получаемые в результате компактные модели системы, также известные как модели пониженного порядка (ROMs – Reduced Order Models), позволяют моделировать характеристики микроустройств с погрешностью в пределах 2–5 % относительно полной численной модели при сокращении времени расчета в 100–1 000 раз.

Преимущество использования ROMs состоит в том, что они точно охватывают поведение устройства в областях различных энергий (механическая, тепловая, электрическая, демпфирование и т. д.). Описания ROMs могут обычно экспортироваться в множество языков описания аппаратных средств ЭВМ (Hardware Description Languages – HDLs) для использования с симуляторами на уровне электрического или системного описания.

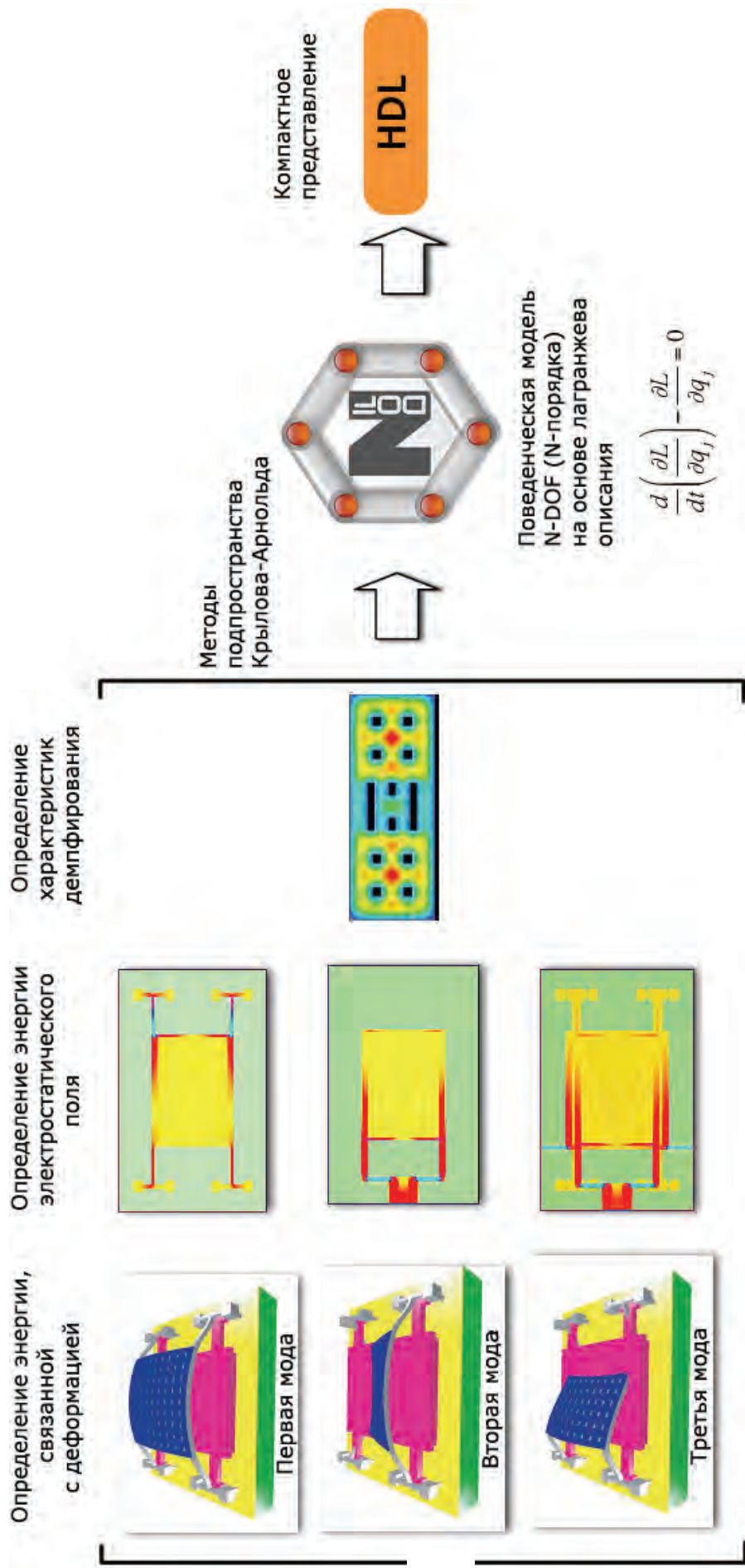


Рис. 5.49. Экстракция моделей в IntelliSuite: 1-й этап – описание для соответствующего режима полной энергии (механической, электростатического поля, рассеяния и др.); 2-й этап – методы подпространства Крылова – Арнольда, используемые для генерации лагранжева описания; 3 этап – создание компактной модели для системного моделирования

5.8. Связь IntelliSuite с EDA инструментами

Инструмент EDA-Linker позволяет включать IntelliSuite непосредственно в процесс работы с EDA инструментами. EDA-Linker обеспечивает совместное моделирование МЭМС с электронными схемами в выбранной программе на уровне системной среды. При этом обеспечивается взаимодействие с различными программными средствами – Cadence, Mentor, Synopsys, Matlab, Tanner или со смешанной инструментальной средой.

IntelliSuite позволяет преобразовать модели сложных электромеханических устройств, таких как гироскопы, резонаторы, переключатели и т. д. в эквивалентные модели на языке описания аппаратных средств. EDA-Linker поддерживает AMS VHDL, Verilog-A, HSPICE, PSPICE, Simulink MEX.

Сводная информация по обмену данными, обеспечиваемому инструментом EDA-Linker, приведена в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Обмен данными на основе открытых форматов

Объект	Форматы
Топология	GDS, DXF, CIF, GERBER, RS-247, EMK, HOLES
Каркасная и трехмерная (твердотельная) модель	IGES, SAT, VRML, GEOM, DXF, RAW (Voxel)
Описание процесса	PowerPoint (PPT), PNG, JPEG, RAW
Моделирование, сеточная модель	UNV, PAT, CDB, SAT (Ansoft, Ansys, ABAQUS, Patran, Nastran, Simulia), MATML (Material XML)
Описание схемы и структуры	VERILOG-A, VHDL-AMS, PSPICE, HSPICE, SIMETRIX, MATLAB/SIMULINK (MEX), TOUCHSTONE
Файлы результатов	ASCII, CSV (Excel), Touchstone, PLT (Tecplot), ODB (Simulia)

IntelliSuite обеспечивает совместимость со многими из существующих инструментов, используемых разработчиками. На уровне топологии он поддерживает прямой обмен данными с L-Edit, Virtuoso, AutoCAD и другими популярными редакторами топологии. На уровне твердотельной модели обеспечивается обмен данными с любыми программами, поддерживающими форматы SAT или IGES, например, SolidWorks, CATIA, ProE. На уровне анализа может осуществляться обмен данными с Abaqus, Ansys, Ansoft, Comsol, Nastran или Patran. В режиме анализа сигналов или на системном уровне данные могут экспортироваться непосредственно в ADS, Ansoft, Cadence, Mentor, Mathworks Simulink, Synopsys, Tanner. Кроме того, все файлы результатов могут отображаться в графическом виде в любом совместимом с Tecplot инструменте.

Заключение

Представленный в данном разделе проблемно-ориентированный пакет IntelliSuite включает широкий спектр инструментальных средств, таких, как модуль схемотехнического проектирования Synple, модуль для разработки топологического чертежа Blueprint, программы для разработки технологического процесса, проектирования на системном уровне, создания трехмерных твердотельных моделей, физического моделирования, экстракции и верификации проектов.

Пакет IntelliSuite позволяет выполнять сквозное проектирование в единой среде на основе общей концепции, включающей методологию как восходящего, так и нисходящего проектирования МЭМС.

Взаимодействие пакета с известными EDA инструментами расширяет возможности его применения при комплексной разработке различных электронных устройств, имеющих в своем составе элементы МЭМС.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите концепцию проектирования МЭМС в пакете IntelliSuite.
2. Приведите сравнительную характеристику нисходящего и восходящего процессов проектирования МЭМС. Укажите достоинства и недостатки этих подходов.
3. Дайте характеристику основных компонентов пакета IntelliSuite. Опишите их функциональное назначение.
4. Опишите основные функции, выполняемые модулем схемного проектирования пакета IntelliSuite.
5. С помощью каких средств производится разработка и проверка топологии МЭМС в пакете IntelliSuite?
6. Какие программные инструменты используются для разработки технологического процесса изготовления МЭМС в пакете IntelliSuite? Дайте их характеристику.
7. Какие возможности обеспечивают инструменты физического анализа пакета IntelliSuite?
8. Для чего служат модули экстракции и верификации моделей в пакете IntelliSuite?
9. Каким образом осуществляется разработка МЭМС при использовании пакета IntelliSuite совместно с внешними EDA-программами?
10. Приведите сравнительную характеристику пакета IntelliSuite и других программных средств проектирования МЭМС.