

Проблемы проектирования и производства контроллеров интеллектуальных датчиков

Ю.Ф. Адамов

Учреждение Российской академии наук
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,

adamov@ippm.ru

Аннотация — Рассмотрены проблемы проектирования и освоения производства контроллеров интеллектуальных датчиков. Приведена структура затрат на подготовку производства. Предложены проектные и организационные методы снижения затрат на подготовку производства. Даны примеры разработки микросхем с использованием модифицированных производственных маршрутов.

Ключевые слова — Контроллеры интеллектуальных датчиков, производство микросхем, технология.

I. РОЛЬ ДАТЧИКОВ В РАЗВИТИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Структура рынка электронных компонентов меняется очень быстро. Практически уже произошло насыщение рынка персональными компьютерами и бытовой электроникой. В ближайшие годы основой производства должны стать микросхемы для информационных систем и сетей. Доходы от изделий микроэлектроники будут создаваться в сфере предоставления информационных услуг. Основы нового бизнеса уже заложены в системах телефонной сотовой связи и Интернет. В обозримом будущем автоматические информационные сети должны внедриться почти во все сферы человеческой деятельности: связь и развлечения, медицина и образование, бизнес и торговля, системы безопасности и навигация, а также многое другое. Взаимодействие пользователей с сетью не должно требовать специальной подготовки. Множество устройств доступа у сети будут работать полностью автоматически или иметь естественный дружественный интерфейс.

Самые многочисленные блоки информационных сетей — это интеллектуальные датчики (ИД), обеспечивающие информацией системы управления. Каждый ИД включает как минимум один чувствительный элемент и микросхему контроллера. Контроллер должен обеспечить измерение физических величин, предварительную обработку результатов измерений и связь с блоком управления системы. Разнообразие требова-

ний к блокам ИД является главной проблемой их производства. При разработке блоков ИД должны использоваться единые требования, обеспечивающие их технологическую, системную и проектную совместимость. Контроллеры интеллектуальных датчиков в своем большинстве являются аналого-цифровыми, а самые жесткие требования предъявляются к аналоговым блокам контроллеров. Наиболее сложная задача — это подготовка технологически реализуемой спецификации. Разнообразие требований к элементам аналоговых блоков очень ограничивает возможности унификации схемотехнических и конструктивных решений. Задача подготовки спецификации должна решаться совместно с выбором технологии производства контроллеров. Для создания всей номенклатуры контроллеров нужны технологии, позволяющие объединять в одном кристалле микросхемы очень большой состав полупроводниковых приборов

II. НОВЫЙ ПРИНЦИП ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ

Решение проблемы состоит в создании производства нового типа. «Разумное производство» (smart foundry) — это не только технологический участок, но и дизайн-центр, и служба поддержки заказчиков. При этом допускается согласованная модификация технологического процесса и правил проектирования для каждого проекта. Такое производство существенно дороже, но обеспечивает выпуск уникальных изделий с высокой добавленной стоимостью.

Показательной является статья генерального директора ОАО «Ангстрем-Т» А.И. Сухопарова, обосновавшего выбор модели «разумного производства» для строящегося технологического участка. Модель «разумного производства» реализуется несколькими зарубежными технологическими компаниями (X-FAB, Silterra). Например, малайзийская компания Silterra аттестовала унифицированный маршрут производства

микросхем. Маршрут позволяет реализовать в одном кристалле транзисторные КМОП структуры с рабочими напряжениями 1.8 В, 3.3 В, 5.0 В, 5.5 В, 32 В, 36 В. Дополнительно могут быть реализованы биполярные транзисторы, конденсаторы с большой удельной емкостью, индукторы, высокоомные резисторы и другие элементы. Технология допускает использование любой комбинации полупроводниковых приборов. Производственный маршрут построен по модульному принципу, позволяющему исключать или изменять некритические операции. Режимы и последовательность критических высокотемпературных операций никогда не меняются, даже если они предназначены для формирования исключенных из структуры элементов. Маршрут модифицируется только в пределах некритических низкотемпературных операций.

Деятельность компании «Х-ФАВ» хорошо известна в России. «Х-ФАВ» поддерживает десятки производственных маршрутов и постоянно расширяет номенклатуру реализуемых полупроводниковых приборов. В 2006 году произошло слияние компаний «Х-ФАВ» и «1st Silicon». И сейчас «Х-ФАВ» обладает технологией с минимальными размерами 180 нм и осваивает 130 нм.

III. ЗАТРАТЫ НА ПОДГОТОВКУ ПРОИЗВОДСТВА

Мелкосерийное производство с множеством опций и модификаций не может быть очень дешевым. Если учесть затраты на изготовление фотошаблонов, то стоимость подготовки производства может стать непреодолимым барьером для многих проектов. И здесь «разумное производство» идет навстречу заказчикам. Для самых мелких опытных партий производители запускают сборные партии, объединяющие несколько разных кристаллов (Multy Project Wafer — MPW). Площадь кадра экспозиции при фотолитографии от 400 до 600 мм². В одном кадре размещается от 10 до 30 кристаллов. Каждый заказчик имеет возможность оплатить только свою долю затрат на подготовку производства. Эта оплата включает первую фиксированную составляющую и вторую пропорциональную площади кристалла. Основной недостаток этого метода состоит в том, что при разных размерах кристаллов невозможно вырезать все кристаллы с одной пластины. Примерно половина кристаллов попадают на линию обреза и уходят в брак.

В симбиозе с производителями существуют компании, которые производят объединение заказов в один комплект шаблонов по типу производственного маршрута, размерам кристаллов и объемам производства. Объединенные заказы снижают потери при разделении пластин на кристаллы, но требуют больше времени на подготовку производства.

Еще один метод снижения затрат на подготовку производства основан на возможности экспозиции пластины не полным кадром, а только его частью. Для этого в установке фотолитографии должна быть вторая маска, закрывающая часть фотошаблона. При этом, один фотошаблон объединяет рисунок двух или четырех топологических слоев. Метод называется (Multy Layer Mask — MLM). Размер кадра экспозиции уменьшается в два или четыре раза соответственно. Уменьшение кадра экспозиции и необходимость менять дополнительные маски снижают производительность оборудования и повышают стоимость пластин.

Соотношение затрат на подготовку и освоение производства можно оценить на основе следующих усредненных показателей для КМОП технологического процесса с минимальными размерами 180 нм на пластинах диаметром 200 мм:

- полный комплект фотошаблонов — 80000 долларов;
- пластина с микросхемами в массовом производстве (более 1000 пластин) — 400 долларов;
- эффективная рабочая площадь пластины — 26000мм²;
- один кв. мм в кристалле микросхемы — 1.5 цента без учета затрат на подготовку производства;
- пластина с микросхемами в мелкосерийном производстве (24 пластины) — 800 долларов;
- один кв. мм в кристалле микросхемы из опытной партии — 3 цента;
- один кв. мм в кристалле микросхемы с учетом затрат на фотошаблоны — 16 центов;
- комплект фотошаблонов для маршрута с MLM (4 маски на шаблоне) — 20000 долларов;
- пластина с микросхемами в мелкосерийном производстве с MLM — 2000 долларов;
- один кв. мм в кристалле на пластине (партия 24 пластины) — 7.7 цента;
- один кв. мм в кристалле с учетом затрат на фотошаблоны — 11 центов;
- стоимость партии из 100 кристаллов для маршрута MPW — 10000 долларов;
- эффективная площадь пластины для маршрута MPW — 15000мм²;
- стоимость одного кв. мм в кристалле размером 5 мм × 5 мм в маршруте MPW — 4 доллара
- стоимость одного кв. мм в кристалле для маршрута MPW (в партии 24 пластины) — 6 центов;
- полная стоимость подготовки массового производства с учетом опытной партии (24 пластины) — 100000 долларов;
- полная стоимость подготовки мелкосерийного производства в маршруте MLM с учетом опытной партии — 68000 долларов;
- полная стоимость подготовки мелкосерийного производства в маршруте MPW с учетом доли в

опытной партии (720 кристаллов 5 мм × 5 мм) — 11000 долларов.

Существуют определенные предпочтения производителей в выборе маршрута для мелкосерийного производства. Компания X-FAB использует маршрут MLM. Это позволяет ей поддерживать большое количество разнообразных производственных маршрутов с минимальными затратами на подготовку производства. Маршрут MPW используется для ограниченного количества наиболее востребованных производственных маршрутов. Компания «Silterra» имеет меньше вариантов производственных маршрутов и использует метод MPW. Маршрут MLM используется только по специальному соглашению с заказчиком.

IV. МОДИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МАРШРУТА, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЯМИ

Компании, реализующие бизнес-модель «разумного производства», сами стремятся расширить возможности выбора элементов микросхем. Для этого базовые маршруты имеют большое количество модификаций, расширяющих состав элементов. Например, компании «X-FAB» и «Silterra» могут реализовать в структуре микросхемы любую комбинацию следующих элементов:

- а) конденсаторы со структурой металл-диэлектрик-металл с высокой удельной емкостью или с высоким пробивным напряжением;
- б) индукторы в слое металлизации толщиной более двух микрон;
- в) поликремниевые резисторы с заданным значением слоевого сопротивления в диапазоне от 80 до 1000 Ом на квадрат;
- г) КМОП транзисторы с высокими и низкими пороговыми напряжениями;
- д) КМОП транзисторы с минимальными размерами и низким напряжением питания для быстродействующих блоков и на том же кристалле высоковольтные КМОП-транзисторы;
- е) биполярные транзисторы на основе КМОП структуры или с использованием эпитаксиальных слоев (только X-FAB);
- ж) изоляция от подложки низковольтных КМОП транзисторов с использованием скрытого p-слоя;
- з) число уровней металлизации от трех до шести по требованию заказчика;
- и) комплексная модификация процесса для реализации блоков однократно программируемых ПЗУ;
- к) комплексная модификация процесса для реализации блоков FLASH памяти (только «X-FAB»).

Расширение числа типов элементов повышает стоимость производства. Однако, в реальных проектах обычно не требуется более 2÷4 типов дополнительных элементов, не входящих в базовый маршрут.

Стоимость производства оценивается по числу циклов с использованием фотолитографии. Стоимость производственного цикла в базовом маршруте около 30 долларов, цикла формирования дополнительных элементов — 40 долларов для каждой пластины. Цены приведены для маршрутов типа MPW и базового, в которых на каждом шаблоне только один кадр экспозиции. Для маршрута типа MLM цены надо увеличить в 2÷3 раза.

V. ПРИМЕРЫ МОДИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ КОНКРЕТНЫХ ЗАКАЗЧИКОВ

Повышение энергоэффективности микросхемы за счет изменения параметров ее физической структуры осуществила одна из российских компаний. Первоначально разрабатывалась одна микросхема специализированного процессора с максимальной тактовой частотой 200 МГц и потребляемой мощностью 1 Вт. Позднее появился заказ на энергосберегающий вариант процессора с теми же функциями и тактовой частотой 40 МГц. Главный недостаток быстродействующего варианта заключался в большом токе утечки в «спящем» режиме — около 4 мА. Оценки параметров показали, что проблема утечек может быть решена увеличением пороговых напряжений КМОП транзисторов на 150 мВ. Снижения динамической мощности можно достичь, уменьшив толщину проводников металлизации и соответствующие емкости между линиями связи. Разработчики согласовали с производителем (компанией «Silterra») необходимые изменения маршрута без изменений в фотошаблонах. В первой же партии были изготовлены оба типа микросхем и оба типа были успешно аттестованы. Сравнение показало, что ток утечек в энергосберегающем варианте уменьшился до 0,1 мА, а мощность для тактовой частоты 40 МГц снизилась на 20 %.

В сфере цветных матричных фотоприемников для фото и видеоаппаратуры сейчас происходят кардинальные изменения. Идет переход на фотоприемники с глубинным цветоделением в кремнии без внешних оптических фильтров. Оригинальные структуры цветных фотоприемников разработаны НИИФП и компанией «Юник Ай Сиз». Для реализации этих структур в составе КМОП микросхем потребовался комплекс изменений в типовом производственном маршруте:

- введены 3 дополнительных легированных слоя с максимальной энергией имплантации 1 млн эВ;
- разработаны маски для легирования с большими энергиями;
- исключены фиктивные элементы в слоях металлизации над фотоприемниками;
- введены металлические экраны для защиты аналоговых блоков от воздействия света;

- уменьшена толщина слоев металлизации и изоляции;
- все слои изоляции над фотоприемниками имеют одинаковый коэффициент преломления. Для этого локально удаляется пассивирующий слой нитрида кремния.

Новые структуры цветных матричных фотоприемников реализованы в составе фоточувствительных микросхем, изготовленных компаниями «X-FAB» и «Silterra». Процесс разработки и согласования производственного маршрута занял около года. Новый производственный маршрут обеспечивает формирование структур цветных фотоприемников и КМОП транзисторов с параметрами, идентичными базовому маршруту. Это позволяет использовать в фоточувствительных микросхемах имеющиеся у производителя библиотеки цифровых и аналоговых элементов и сложнофункциональных блоков.

Следует особо отметить, что разработка нового производственного маршрута велась без проведения финансовых расчетов между участниками проекта. Основным продуктом стала совместная интеллектуальная собственность.

VI. НОВЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Во множестве случаев себестоимость микросхем контроллеров определяется затратами на подготовку производства. Снижение доли этих затрат в себестоимости микросхем возможно только за счет увеличения объемов выпуска. Расширение функций микросхем позволяет сократить номенклатуру продукции, увеличить объем выпуска каждого типа и сократить затраты на подготовку производства.

Обычно большая часть площади кристалла контроллера занята чувствительными элементами, аналоговыми блоками, блоками ввода-вывода информации. Цифровая часть занимает 10÷25 % площади. Параметры чувствительности определяются аналоговой частью, а функции обработки — цифровой [1]-[3]. Расширение функциональных возможностей достигается усложнением цифровой части микросхемы. Легко обеспечить широкие возможности цифровой обработки, разместив на кристалле микропроцессор. Однако, это возможно только при отсутствии жестких ограничений на потребляемую мощность. В подавляющем большинстве случаев ограничения на мощность определяют выбор цифрового блока на основе конечного автомата. Расширение функций цифрового автомата обычно ограничивается числом вариантов менее десяти. Площадь цифрового блока возрастает не более, чем вдвое, а общая площадь кристалла всего на несколько процентов. Установка требуемых функций многофункциональной микросхемы производится

программированием энергонезависимой памяти или подключением дополнительных установочных входов к потенциалам «земли» и питания. В России имеются примеры разработки многофункциональных контроллеров для систем пожарной безопасности [4].

Для дальнейшего освоения бизнес-модели «разумного» производства в России необходимо создать структуру, которая объединяла бы технологически совместимые проекты в один комплект фотошаблонов и размещала заказы в компаниях, поддерживающих мелкосерийное производство.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инициатором модификации производственного маршрута всегда выступает разработчик микросхем. Модификация должна быть обоснованной и реализуемой. Для этого требуется изучение возможностей технологии и оценка затрат на внедрение новых процессов. Оценка параметров новых элементов микросхем и расчет режимов их формирования требуют проведения дополнительного этапа физико-технологического моделирования структуры микросхемы. Согласование изменений в производственном маршруте требует взаимодействия не только с менеджерами компании производителя, но и с техническими специалистами. Технологи должны модифицировать модель производственного маршрута и внести изменения в программы автоматического управления технологическими процессами. Высокая степень автоматизации современного производства обеспечивает управляемость технологического маршрута. Современные средства технологического проектирования позволяют получить требуемые характеристики новых элементов структуры в первой же партии пластин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Адамов Д.Ю., Матвеев О.С. Новые технологии для контроллеров интеллектуальных датчиков // Датчики и системы. - 2009. - № 9. - С. 50-51.
- [2] Матвеев О.С. Особенности проектирования интеллектуальных датчиков // Труды 51-й научной конференции МФТИ. Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. - 2008. - С. 172-174.
- [3] Матвеев О.С., Сибгатуллин А.Г. Высокоинтегрированная интегральная микросхема контроллера оптоэлектронного дымового пожарного извещателя для систем пожарной безопасности // Труды 52-й научной конференции МФТИ. Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. - 2009. - С. 176-178.
- [4] Адамов Ю.Ф., Куликов К.Е., Куцов А.С., Сибгатуллин А.Г. Дымовой оптико-электронный пожарный извещатель. Патент Российской Федерации на изобретение №2356097 по заявке № 2008112088 от 20 мая 2009.