

И. А. РОДИОНОВ, к. т. н. В. В. МАКАРЧУК

Россия, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана
E-mail: ilro@bk.ru

Дата поступления в редакцию
01.03 2007 г.

Оппонент к. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН
(НИИ ПП, г. Томск)

КОРРЕКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МИКРОСХЕМ

Процесс проектирования и дальнейшего производства современной интегральной полупроводниковой микросхемы включает в себя тысячи итераций. Условно его можно разделить на две крупные части — на разработку и проектирование и на технологию производства. Сегодня обе эти части неразрывно связаны — именно технология определяет и ставит перед разработчиком внушительный ряд требований и ограничений. Проектирование ведется по модульному принципу — группой разработчиков проектируются сначала простейшие логические элементы (XOR, OR, AND, NAND и т. п.), далее, используя эти субблоки, создаются логические элементы более высокого уровня (AND8X3, NA5X3, MU8X4 и т. п.), полученные группы элементов объединяются в библиотеки. Используется так называемое «сквозное» проектирование, когда каждая ячейка не только представляет собой топологию (технологическая модель), но и соотносена с логической и электрической моделями.

Каждая библиотека разрабатывается под конкретную технологию. Разработка подобной библиотеки возможна только при участии как разработчиков, так и технологов. Разработчики определяют логику работы, архитектуру будущей микросхемы, задают электрические параметры, а технологи, помимо решения своих задач, принимают непосредственное участие в проектировании топологии. Совместно разрабатывают правила проектирования, в которых описываются возможности технологии по воспроизведению различных топологических конструкций в условиях различных технологических слоев.

После преодоления барьера в 1 мкм стало необходимым учитывать оптические эффекты, возникающие в условиях субмикронных размеров, когда длина волны экспонирующего излучения становится сопоставимой с размерами элементов на пластине. Технологические «уходы» в этом случае достигают десятков процентов от номинального размера [1].

Существуют два принципиально различных способа, позволяющих скорректировать эти уходы:

- подбор технологических режимов;
- введение коррекций на этапе проектирования микросхем.

Первый способ дает положительные результаты. Проведя анализ технологических уходов на этапах получения скрытого изображения в толще резиста, проявления (получения изображения на фоторезис-

тивной маске) и травления (получения структур на пластине), можно сделать вывод о требуемом номинальном размере на фотошаблоне для получения заданных размеров на пластине. Но при работе с субмикронными размерами становится явным отличие в проработке фигуры контроля линейных размеров: одиночных и плотноупакованных структур (рис. 1).

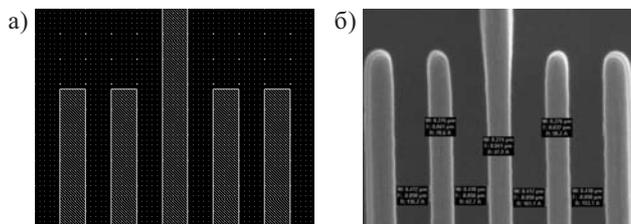


Рис. 1. Проработка фигуры контроля линейных размеров: а — при проектировании, на фотошаблоне; б — после фотолитографии, на фоторезистивной маске

На фотографиях отчетливо видны эти различия (при проектировании и на фотошаблоне все пять проводников имеют одинаковые номинальные размеры). Центральный проводник, отвечающий параметрам одиночной структуры, имеет больший размер и угол наклона боковой стенки профиля резиста, боковые проводники также утолщены со «свободной» стороны. Поэтому для одиночных и плотноупакованных структур необходимы различные режимы технологической обработки. Таким образом, необходимо либо обеспечить равномерную плотность структур по всему кристаллу микросхемы, либо произвести «тонкий» (очень точный) подбор технологических режимов. Обеспечить равномерную плотность структур при проектировании кристалла микросхемы невозможно на практике. Подобрать технологические режимы — можно, и данный метод используется в частных случаях, но это экономически невыгодно и требует больших временных затрат, что также недопустимо в условиях современного рынка.

Второй способ — введение коррекций на этапе проектирования микросхем — является основным и используется всеми мировыми производителями полупроводниковой индустрии [2, 3]. Введение коррекций на этапе проектирования позволяет:

- обеспечить заданные параметры получаемых на пластине структур;
- повысить стабильность технологического процесса (ТП);

— повысить процент выхода годных кристаллов на пластине;
 — исключить из производственного цикла стадию обработки ТП под конкретный тип изделия.

Введение коррекций может осуществляться изменением библиотечных элементов; в этом случае библиотека элементов разрабатывается фабрикой-производителем (FAB) и поставляется разработчикам микросхем. Вторым вариантом введения коррекций является использование специализированных САПР, которые позволяют обрабатывать топологию кристалла микросхемы целиком, изменяя ее в соответствии с требованиями технологии FAB [4].

В условиях стремительно изменяющегося рынка и появления инновационных методов в производстве КМОП СБИС, которые разрабатываются под современную планарную технологию, чтобы сохранять лидирующие позиции в индустрии, FAB должна обладать автоматизированной масштабируемой модульной системой проектирования, интегрированной в процесс производства. Такая система должна позволять легко и в сжатые сроки доводить инновационные идеи непосредственно до процесса производства, исключая долгосрочные этапы тестирования. Такой подход к процессу производства КМОП СБИС невозможен без моделирования ТП с использованием передовых программ CAD и TCAD. В данной работе мы попытались использовать описанный выше подход: на первом этапе было проведено моделирование и подбор типоразмеров фигур коррекции, затем по результатам моделирования был выбран диапазон и тип фигур коррекции, и на завершающем этапе результаты моделирования были проверены экспериментом.

Фигуры коррекции призваны исключить разницу в проработке на пластине элементов различной плотности, а также компенсировать эффект укорочения поликремниевых затворов в активной области транзистора, что может привести к эффекту укорочения канала, всевозможным утечкам, изменению электрических параметров транзисторов и т. п. В первом приближении выделяют три вида фигур коррекции:

- 1) изменение номинального размера на фотошаблоне на величину, определяемую технологическим уходом на операциях фотолитографии и травления (bias, рис. 2, а);
- 2) введение дополнительных линий (assist line или auxiliary, рис. 2, б);
- 3) введение дополнительных фигур типа serif, anti serif, barrel, hammerhead (рис. 2, в—е).

Рассмотрим принципы действия всех вышеперечисленных фигур коррекции.

Bias. Анализ уходов размеров проводников (как одиночных, так и в массиве) в процессе производства позволяет сделать вывод о том, каким должен быть номинальный размер проводника на фотошаблоне, чтобы на пластине получился заданный номинальный размер.

Assist line. Дополнительные линии вводятся, чтобы создать эффект плотноупакованных структур для одиночного проводника. Различия в проработке оди-

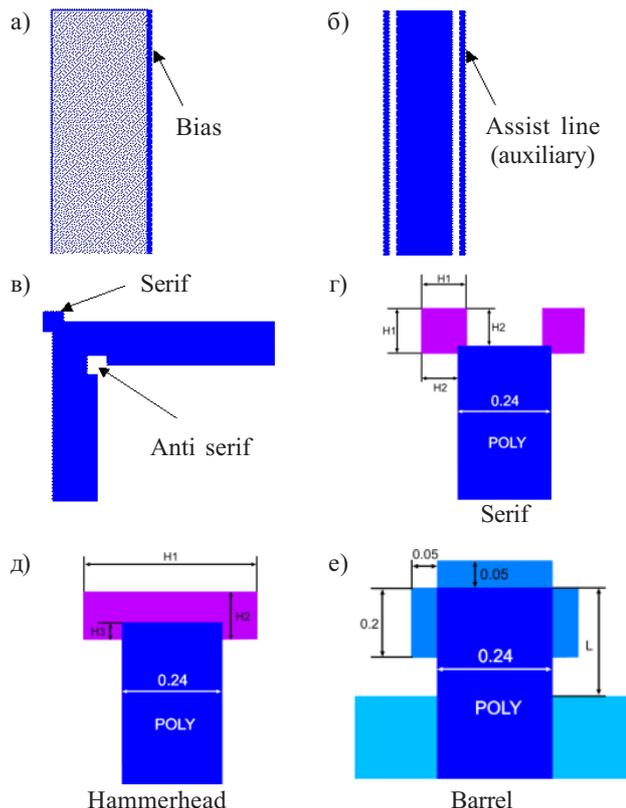


Рис. 2. Фигуры коррекции оптического эффекта близости

ночных и плотноупакованных проводников возникают в результате дифракции лучей света на соседних проводниках, в результате этого плотноупакованные структуры засвечиваются большей дозой. Дополнительные линии имеют размер $1/2$ — $1/3$ от проектной нормы. За счет этого эти линии не прорабатываются на пластине, но дифракция лучей света на них все же происходит; в результате на пластине получается одиночный проводник, имеющий размерные характеристики как у плотноупакованного.

Serif. Как известно, проводники, расположенные под прямым углом, не прорабатываются на пластине, присутствует эффект округления. Как показано на рис. 3, L-образная фигура искажается: помимо скругления углов, также происходит укорачивание проводников со стороны «открытого» конца. Чтобы избежать этого эффекта, проектировщики вводят фигуры коррекции типа serif, anti serif, barrel, hammerhead, jogs и т. п.

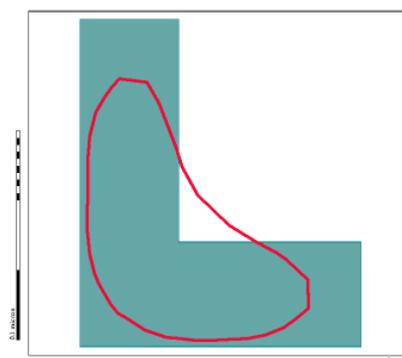


Рис. 3

В рамках разработки технологического процесса на проектную норму 0,25 мкм был выполнен ряд работ по разработке новых технологических процессов фотолитографии. Главной особенностью данных процессов является непосредственная близость паспортных возможностей используемого оборудования и целевых параметров структур, получаемых в критичных слоях. В качестве фоторезиста высокого разрешения было выбрано семейство фоторезистов Ultra-i 123 компании Rohm&Haas. Для компенсации оптического эффекта близости было проведено моделирование процесса фотолитографии. На рис. 4 показан пример полученных результатов по итогам моделирования одиночных шин с примыканием встык.

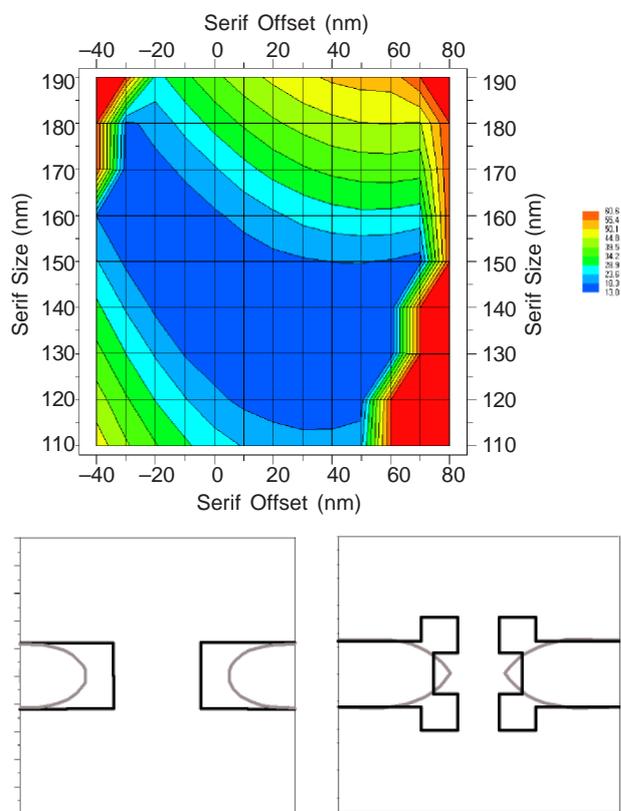


Рис. 4. Моделирование одиночных шин с примыканием встык

Моделирование элементов коррекции типа «serif» для одиночных шин номинальным размером 0,24 мкм с примыканием встык показало, что оптимальный размер Serif size=130 нм, Serif offset=20 нм.

Оценка эффективности применяемых методов коррекции — еще одна большая математическая задача, т. к. невозможно каким-либо образом провести сравнение запроектированных структур со структурами, полученными на пластине. Возможными методами оценки эффективности могут служить:

- оптические методы сравнения;
- математический анализ полученных структур.

Например, в случае анализа L-образного проводника за образ шины можно принять исходящие проводники на расстоянии $(2...3)\lambda$ от угла. Тогда, про-

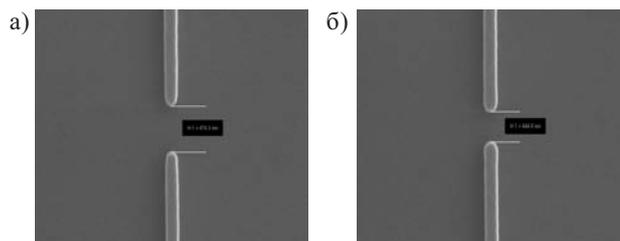


Рис. 5. Полученные на пластине одиночные шины с примыканием встык:

a — без элементов коррекции; *b* — с элементами коррекции типа «serif»

ведя по ним прямые, получим на их пересечении образ L-подобного проводника. Минимум разности площади образа и площади полученной структуры (которую можно посчитать, взяв интеграл) и даст наиболее эффективный результат.

Рассмотрение критериев оценки эффективности введения фигур коррекции оптического эффекта близости выходит за рамки настоящей статьи. Критерием качества проработки топологии для данного типа шин было выбрано укорочение шин. При заданном на шаблоне расстоянии между расположенными встык одиночными проводниками, равным 0,36 мкм, укорочение шин без элементов коррекции составило 160 нм (рис. 5, *a*). Для шин с элементами коррекции типа «serif» укорочение составило 42 нм.

Проведенный эксперимент показал, в первом приближении, следующие результаты:

- получены сведения о типах и типоразмерах фигур коррекции оптического эффекта близости для одиночных и плотноупакованных структур;
- проведено моделирование технологического процесса фотолитографии для различных типичных видов топологии;
- выбраны параметры фигур коррекции;
- сформированы критерии оценки эффективности введения фигур коррекции.

На основании проведенных исследований был спроектирован фотошаблон для отработки режимов фотолитографии и дальнейшего изучения влияния эффектов оптической близости.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Sixt P. Optical proximity correction (OPC) // Technology Review.— 2003.— Vol. 1.— Issue 7.
2. Stirniman J. P., Rieger M. L. Fast proximity correction with zone sampling // Proc. SPIE Microlithography.— 1994.— N 2197.— P. 294—301.
3. Maurer W., Waas T., Eisenmann H. Evaluation of a fast and flexible OPC package // OPTISSIMO, Proc. SPIE BACUS.— 1996.— N 2884.— P. 412—418.
4. Cui Y., Zach F. X., Butt S. et al. Is model-based optical proximity correction ready for manufacturing? Study on 0,12 um and 0,175 um DRAM Technology // Proc. SPIE Microlithography.— 2002.— N 4691.— P. 67—75.