УДК 621.3.049.77+621.385.833.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

В. А. Пилипенко¹, Т. В. Петлицкая¹, С. А. Чижик², Т. А. Кузнецова²

¹ НПО «Интеграл», пл. Казинца, г. Минск, Беларусь

² Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, ул. П. Бровки 15, г. Минск, Беларусь

Введение

Повышение степени интеграции сверхбольших интегральных схем (СБИС) приводит к значительному уменьшению размеров элементов топологии (до 0,18...0,35 мкм и менее): ширина элементов становится соизмеримой с высотой. При этом резко возрастает влияние конфигурации профиля элементов топологии на стабильность параметров и работоспособность СБИС. В данных условиях важнейшее значение приобретает технологический контроль таких показателей качества процесса формирования элементов СБИС, как профиль вытравленных структур, отсутствие на стенках элементов и на дне рельефов остатков вторичных продуктов реакций плазмохимического травления.

Развитие методов технологического контроля в микроэлектронике следует от визуального контроля микро- и макродефектов, измерения размеров элементов в плоскости к контролю пространственных дефектов и размеров меньше 0,5 мкм, характеризующих трехмерную конфигурацию микрорельефа топологических структур. Контроль элементов топологии с размерами 0,18...0,35 мкм и менее оптическими методами становится невозможным. Используемый для анализа микрорельефа метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) позволяет получить требуемое разрешение. Однако он имеет ряд ограничений в применении для оперативного контроля в условиях серийного производства. В частности, этот метод используется в условиях вакуума, относится к разряду разрушающего контроля и требует специальной подготовки образцов при контроле пространственных параметров, что снижает эффективность его использования в производственных условиях.

Метод атомно-силового зондового сканирования, применяемый в научных исследованиях, позволяет проводить контроль конфигурации профиля топологии с субмикронными размерами и разрешением от 1 до 10 нм в плане (латеральное) и от 0,1 до 0,5 нм по вертикали [1-4]. Это метод неразрушающего контроля, не требует специальной подготовки образцов и вакуума и может применяться в условиях «чистых зон». Поэтому весьма привлекательной представляется работа по созданию комплексной системы с комбинацией взаимно дополняющих методов контроля на базе оптической и атомно-силовой микроскопии, обеспечивающей достоверность, информативность, производительность и снижение расходов при межоперационном контроле.



В технологии производства интегральных схем есть множество проблем контроля качества проведения технологических операций, эффективно решить которые можно было бы с использованием атомно-силового микроскопа. Например, одна из ключевых операций – контроль профиля травления. В настоящее время он возможен только при использовании специальных тестовых структур с формированием на них скола и последующим исследованием скола с применением РЭМ. Трудоемкость такого контроля затрудняет принятие решения о правильности технологических режимов, формирующих нужный профиль. Это касается и в целом мониторинга технологических процессов, который также основан на анализе тестов, состоящих из многочисленных повторяющихся структур. В итоге снижается качество и повышается себестоимость изготавливаемой продукции. Вообще контроль формирования специальных малоразмерных профилей в кремнии (например, метки совмещения) и в типовой структуре кристалла очень трудоемок, что, конечно, оказывает влияние на качество продукции.

В технологии телевизионных ИМС используется поликремниевый эмиттер. Морфология поверхности поликремния (наличие и размер зерен, высота микрорельефа) существенным образом сказывается на удельном сопротивлении данного слоя. Поскольку отсутствует прямой метод контроля микрорельефа поверхности металлических пленок, невозможно провести корреляцию между морфологией пленок и технологическими режимами ее формирования. Из-за этой проблемы в конструкторской документации заложены большие допуски на коэффициент усиления транзисторов, что крайне нежелательно при расчете электрической схемы будущей ИМС.

Методика эксперимента

Исследование топологических слоев проведено на специальных тестовых матрицах, изготовленных по технологическим маршрутам серийно выпускаемых ИМС. В данной работе исследовались два вида тестовых матриц с гребенками из шин поликристаллического кремния и с гребенками из шин металлизации алюминием. Шины шириной 0,5, 0,55, 0,6, 0,65 мкм и зазорами между ними 0,5, 0,6, 0,7 и 5 мкм располагались на рельефах SiO_2 (ширина 0,7, 1 и 2 мкм, зазоры 0,7, 1 и 2 мкм соответственно). Таким образом, каждая тестовая матрица содержала в себе 48 образцов различных комбинаций топологических слоев – всего 92.

Для исследования топографии топологических слоев ИМС применялись методы оптической, растровой и атомно-силовой микроскопии. В работе использовался атомно-силовой микроскоп NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь). Применялись стандартные кремниевые кантилеверы производства NT-MDT и Miсготаsh Co. (Россия).

Результаты эксперимента и их обсуждение

Оптическая микроскопия дает изображение ИМС, по которому возможно контролировать лишь грубые нарушения техпроцесса (рис. 1, а): неразрывность шин, отдельные крупные дефекты микросхемы.

РЭМ является традиционным высокоразрешающим методом контроля качества структур ИМС. Его достоинства особенно очевидны, когда требуется собрать статистически обоснованный массив данных о точности контуров элементов



ИМС в горизонтальной плоскости (рис. 1, б). При этом контуры нижележащего рельефа не просматриваются. Проблема может быть решена последовательной повторной съемкой одного и того же участка ИМС при фокусировке на верхнюю поверхность шины и при перефокусировке на верхнюю поверхность рельефа. Однако высота элементов ИМС остается не определенной. Применяя используемый в настоящее время методический подход с получением скола и исследованием его РЭМ, вносят погрешность из-за неперпендикулярности плоскости случайного скола поверхности подложки и трудности расположения плоскости скола в камере электронного микроскопа таким образом, чтобы не искажался вертикальный размер шины. Так, по РЭМ-изображениям, вертикальный размер шин составляет более 1000 нм. К достоверным данным при анализе этого излома относится факт, что шины имеют сечение в форме трапеции.



Рис. 1. Оптическое и РЭМ-изображения ИМС: фрагмент структуры теста формирования микрорисунка ИМС с рельефами 2х2 мкм² и интервалом между шинами 5 мкм, х 150 (а); микрорисунок ИМС с рельефами 2х2 мкм² и интервалом между шинами 0,5 мкм, х 10000 (б)

Методом АСМ возможно получить полное изображение трехслойной топографии «подложка – рельеф – шина» ИМС (рис. 2) с точной оценкой высоты элементов. Реальная форма шин поликристаллического кремния в плане отличается от идеальной полосы, что соответствует данным РЭМ (рис. 1, б). В середине выступающего рельефа SiO₂ шина имеет наименьшую ширину, а по границам рельефа и в промежутках между полосами рельефа – наибольшую. Кроме того, наблюдается сужение от основания шины к ее верхней поверхности: вертикальное сечение шин поликристаллического кремния, полученное методом АСМ, имеет форму трапеции.

Выбор размера поля сканирования в АСМ определяется задачами исследования. Если необходимо проконтролировать дефектность шин, точность контура, их непрерывность, следует использовать максимальные поля сканирования (32х32 мкм²). Для измерения же вертикальных и горизонтальных размеров единичной шины предпочтительнее выбирать поле сканирования 10х10 мкм² и меньше.





Рис. 2. Трехмерные ACM-изображения топографии ИМС с шинами и нижележащими рельефами: фрагмент с поликремниевыми шинами, поле сканирования 10x10 мкм² (а); фрагмент с алюминиевыми шинами, поле сканирования 10x10 мкм² (б); участок разрывов алюминиевых шин (в); профиль поперечного сечения изображения «б» через середины алюминиевых шин по центру рельефа (г)

АСМ дает возможность кроме отклонения в латеральных размерах (по ширине шины) фиксировать отклонение по высоте шин. Если первый параметр (ширину) можно контролировать РЭМ и в ряде случаев этот контроль может быть точнее и оперативнее, то отклонения вертикальных размеров шин может зафиксировать только АСМ. Так, на поле 17х17 мкм отклонения по высоте различных шин на одном рельефе от максимальной (760 нм) могут иметь значения от 240 до 60 нм.

Обнаружено, что перетравливание шин, заметное по нарушению правильных очертаний контура шины, может снижать ее высоту почти в два раза. По ACM-изображению фрагментов поликремниевых шин правильной формы с параллельными краями высота составила 600 и 620 нм, а высота шин с искаженными очертаниями – 360 и 310 нм. Высота шин в промежутках рельефов колебалась от 630 до 830 нм.

Неоднородность высот шин может проявляться даже при переходе на другие участки в пределах десятка микрометров. Так, высота двух поликремниевых шин на одном участке составила 470 и 700 нм, а на соседнем 640 и 600 нм. Чем больше отклонения латеральной формы шин от правильных параллельных контуров, тем больше у них отклонения и вертикальных размеров. Высоты шин неправильной формы составили 370 и 580 нм на одном рельефе изображения и 300 и 380 на



соседнем рельефе. У шин правильной геометрической формы отклонения высот значительно меньше, например, у шин высотой 640 и 513 нм на одном рельефе зафиксирована высота 610 и 590 нм на соседнем рельефе изображения.

Опытным путем подобрано оптимальное расположение шин относительно направления сканирования. Наилучшим оказалось расположение шин параллельно направлению сканирования. Плавный подъем зонда относительно рельефа шины в этом случае предупреждает срывы на изображении. При расположении шин под углом к направлению сканирования на стороне шины, на которую «наезжает» зонд, образуются срывы, вызванные слишком резким увеличением рельефа. Высота же всех элементов микросхемы, несмотря на срывы, и при расположении шин под углом к направлению сканирования определяется правильно: высота рельефа около 400 нм, высота шин относительно рельефа 630–690 нм. Перпендикулярное расположение шин по отношению к направлению сканирования также не позволяет сканеру точно отрабатывать достаточно высокий для ACM рельеф. Поэтому происходит некоторое завышение высот шин из-за инерционности пьезосканера: их высота, определенная по такому изображению, составляет 720–740 нм, что на 20–50 нм выше значения, определенного при ориентации шин параллельно направлению сканирования.

Одновременное с измерением геометрических размеров шин исследование нижележащего рельефа SiO₂ показало, что может иметь место отклонение в его латеральных размерах в сравнении с проектными нормами.

Образец ИМС с гребенками из шин поликристаллического кремния использовался для отработки методического подхода к АСМ-исследованию топологии ИМС, который затем применялся на образце с металлизацией алюминием.

Сравнительный анализ АСМ-изображений образца микросхемы с алюминиевыми шинами выявил их меньшую высоту и бо́льшую точность формы по сравнению с образцом микросхемы с кремниевыми шинами. У алюминиевых шин края в плане параллельны друг другу, не сужаются в центре рельефа. Ширина алюминиевой шины в верхней плоскости практически равна ширине у основания (рис. 2, б, 3, б). Высота алюминиевых шин, определенная по соседним профилям, составила 355 и 347 нм для шин на одном профиле изображения и 345 и 342 нм для тех же шин на соседнем профиле изображения. Таким образом, для алюминиевых шин кроме меньшей высоты характерна большая стабильность размеров. Высота рельефов SiO₂, на которых расположены шины в этом образце, также ниже и составляет 280 нм. Кроме того, в данном образце точнее выдержан интервал размеров «полоса – промежуток». Он ближе к заданной величине $2x2 \text{ мкm}^2$, чем у первого образца. АСМ хорошо фиксирует разрывы шин и дефекты их формы (рис. 2, в).

Совмещение режима «Torsion» с трехмерным изображением топографии дает возможность кроме определения высот топологических слоев выявить структуру их поверхности: зеренное строение материала шин, в особенности алюминиевых (рис. 3).



МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ 2006



Рис. 3. Трехмерное изображение топографии поверхности ИМС, совмещенное с режимом «Torsion»: фрагмент с поликремниевыми шинами, поле 10x10 мкм² (a); фрагмент с алюминиевыми шинами (б)

Следует отметить режим «Гистограммы высот» (Height distribution) в программном обеспечении «SurfaceView» ACM «NT-206» (ОДО «Микротестмашины», Беларусь). Статистический анализ высот элементов микросхем методом АСМ достаточно трудоемок. Для набора достоверного массива данных необходимо провести измерение большого количества изображений. При этом по каждому изображению делается несколько профилей. Профили маркируются измерительными метками не менее чем в 10 точках оператором вручную. Затем следует обработка данных в «Excel». Режим «Гистограмма высот» позволяет сделать это оперативно и очень точно – в анализе участвуют все точки матрицы изображения (в большинстве исследований 256х256). На поле сканирования 10х10 мкм² (рис. 2, б) интегральная высота рельефов в рассматриваемой микросхеме составляет 280 нм, а высота шин 340 нм. Получив гистограмму высот нормированной поверхности изображения участка микросхемы с алюминиевыми шинами на поле 30х30 мкм², получаем три пика: 740, 396 и 123 нм. Разность между первым и вторым 344 нм составляет высоту шин, а разность между вторым и третьим, равная 273 нм, - высоту рельефов. Таким образом, демонстрируется полная сходимость и высокая точность режима «Гистограмма высот» для определения высот элементов микросхем.

Выводы

1. Методами оптической, растровой и атомно-силовой микроскопии проведены исследования топографии поверхности тестовых матриц с шинами из поликристаллического кремния и алюминиевыми, изготовленных по технологическим маршрутам серийно выпускаемых ИМС.

2. Показана эффективность метода ACM в осуществлении метрологических измерений топологических слоев серийно выпускаемых ИМС, его неоспоримое преимущество перед оптической микроскопией и незаменимость в измерении высот. Для определения латеральных размеров шин целесообразно его дополнение РЭМ.



3. Показана эффективность режима «Гистограммы высот» обрабатывающей программы «SurfaceViev» ACM «NT-206» при определении среднеквадратической толщины топологических слоев ИМС.

4. Высота шин на тестовых матрицах с шинами из поликристаллического кремния составила 560-700 нм, а на матрицах с шинами алюминия 340–350 нм.

Благодарность

Работа финансировалась в рамках задания МЭ 4.3 ГНТП «Белэлектроника».

Литература

- 1. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и наноэлектроники . Часть І // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 6. С. 405–414.
- 2. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и наноэлектроники . Часть II // Микроэлектроника. 2000. Т. 29. № 1. С. 13–22.
- 3. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л., Демидов В. Н. Параметры шероховатости по данным измерений атомно-силового микроскопа // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С. 431–439.
- 4. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. Феноменологическое описание характеристик поверхности, измеряемых атомно-силовой микроскопией // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 3. С. 524–534.

