

УДК 621.3.049.77+621.385.833.2

В.А. ПИЛИПЕНКО, С.А. ЧИЖИК, В.В. ПОНАРЯДОВ, Т.В. ПЕТЛИЦКАЯ, Т.А. КУЗНЕЦОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

The efficiency of the atomic-force microscopy method is demonstrated by metrological measurements of the mass-produced IC layout layers. Indisputable advantages of this method over optical microscopy are indicated, its irreplaceability in measurements of the microrelief height is emphasized.

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

Развитие методов технологического контроля в микроэлектронике идет от визуального контроля микро- и макродефектов к контролю пространственных дефектов размером меньше 0,35 мкм, характеризующих трехмерную конфигурацию микрорельефа топологических структур. Контроль элементов топологии такими 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 комнатных условиях и относится к разряду разрушающего контроля серийного производства. В частности, этот метод используется в вакууме 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 латеральным разрешением от 1 до 10 нм и от 0,1 до 0,5 нм по вертикали [1–4]. Этот метод неразрушающего контроля не требует специальной подготовки образцов и вакуума и может использоваться 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 целое 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 с помощью специальных тестовых структур путем формирования на них скола и последующего его исследования с использованием РЭМ. Трудоемкость такого контроля затрудняет принятие решения о правильности технологических режимов, формирующих нужный микрорельеф. Это касается и мониторинга технологических процессов в целом, 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, сказывается на качестве продукции.

Оптической микроскопии в связи с уменьшением проектных норм проектирования становится уже недостаточно. Наличие в оптическом микроскопе атомно-силовой функции с хорошим сервисным программным обеспечением делает его незаменимым для каждой технологической операции.

В технологии телевизионных интегральных микросхем (ИМС) используется поликремниевый зазор. Морфология поверхности поликремния (наличие и размер зерен, высота микрорельефа) существенным образом сказывается на удельном сопротивлении данного слоя. Из-за отсутствия прямого метода контроля микрорельефа поверхности металлических и поликристаллических пленок невозможно провести корреляцию между морфологией пленок и технологическими режимами их формирования. Поэтому в конструкторской документации заложены большие допуски на коэффициент усиления транзисторов, а это крайне нежелательно при расчете электрической схемы будущей ИМС.

Исследование топологических слоев проведено на специальных тестовых матрицах, изготовленных по технологическим маршрутам серийно выпускаемых ИМС. В данной работе использовались два вида тестовых матриц: одни с гребенками из шин поликристаллического кремния, другие из шин алюминиевой металлизации. Шины шириной 0,5, 0,55, 0,6, 0,65 мкм и зазорами между ними 0,5, 0,6, 0,7 мкм располагались на рельефах SiO₂ (шириной 0,7, 1,0 и 2,0 мкм, зазоры 0,7, 1,0 и 2,0 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-силового микроскопии. В работе использовался атомно-силовой микроскоп NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь), стандартные кремниевые кантилеверы производства NT-MDT и MicromasH Co (Россия).

Оптическая микроскопия дает изображение ИМС, по которому можно контролировать лишь грубые нарушения техпроцесса (рис. 1 а).

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 верхнюю поверхность рельефа. Однако высота элементов ИМС остается не определенной. Используемая в РЭМ методика скола имеет погрешность, поскольку скол может пройти не абсолютно пер-

пендикулярно поверхности подложки, т. е. составлять менее или более 90° , что вносит искажения в вертикальный размер шины. К достоверным данным при анализе скола относится факт, что шины имеют сечение в форме трапеции.

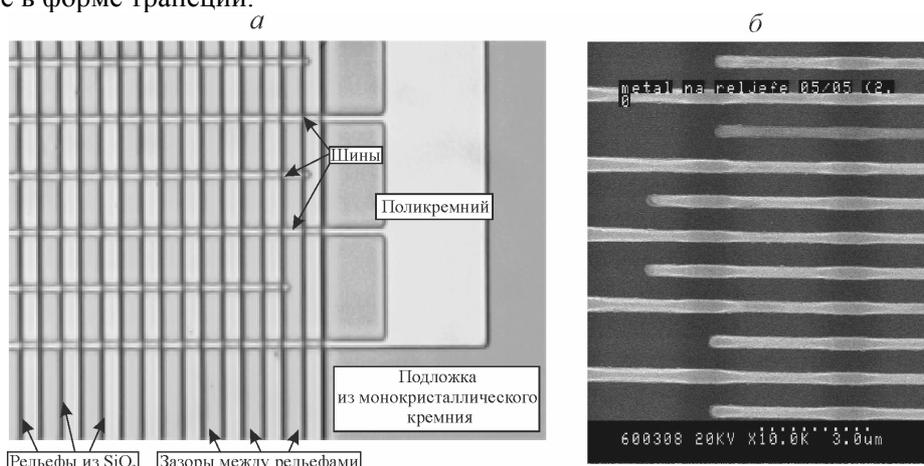


Рис. 1. Оптическое $3000\times$ (а) и РЭМ-изображение (б) ИМС: фрагмент структуры теста формирования микрорисунка ИМС с рельефами

Методом АСМ можно получить полное изображение трехслойной топографии «подложка – рельеф-шина» ИМС (рис. 2) с точной оценкой высоты элементов. Реальная форма шин поликристаллического кремния отличается от идеальной полосы. В середине выступающего рельефа SiO_2 шина имеет наименьшую ширину, а по границам рельефа и в промежутках между его полосами – наибольшую. Кроме того, наблюдается сужение от основания шины к ее верхней поверхности: вертикальное сечение шин поликристаллического кремния, полученное методом АСМ, имеет форму трапеции.

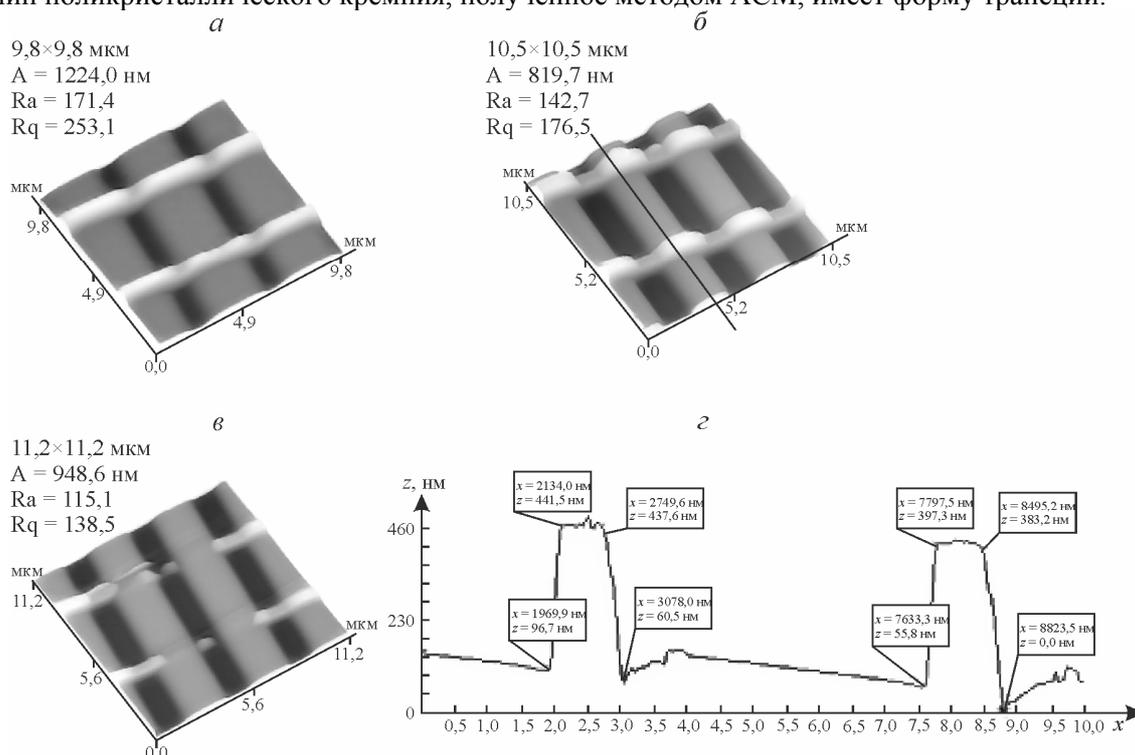


Рис. 2. Трехмерные АСМ-изображения топографии ИМС с поликремниевыми шинами, поле сканирования $10\times 10 \text{ мкм}^2$ (а); фрагмент с алюминиевыми шинами, поле сканирования $10\times 10 \text{ мкм}^2$ (б); участок разрывов алюминиевых шин (в); профиль поперечного сечения изображения «б» через середины алюминиевых шин по центру рельефа (z)

Выбор размера поля сканирования в АСМ определяется задачами исследования. При необходимости проконтролировать дефектность шин, точность контура и их непрерывность следует использовать максимальные размеры поля сканирования $32\times 32 \text{ мкм}$. Для измерения же вертикальных и горизонтальных размеров единичной шины предпочтительнее выбирать поле сканирования $10\times 10 \text{ мкм}$ и меньше.

АСМ дает возможность, кроме отклонения в латеральных размерах, т. е. по ширине шины, фиксировать отклонение и по ее высоте. 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 17×17 мкм отклонения по высоте на одном рельефе от максимальной (760 нм) могут иметь значения от 60 до 240 нм.

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

Опытным путем было 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 той стороне изображения 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: для рельефа она составляет около 400 нм, для шин относительно рельефа – $630 \div 690$ нм. Перпендикулярное расположение шин по отношению к направлению сканирования также не позволяет сканеру точно обрабатывать достаточно высокий для АСМ рельеф. Поэтому происходит некоторое завышение высоты шин из-за инерционности пьезосканера: их высота, определенная по такому изображению, равнялась $720 \div 740$ нм, что на $20 \div 50$ нм выше значения при ориентации шин параллельно направлению сканирования.

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

Сравнительный анализ АСМ-изображений образца микросхемы с алюминиевыми шинами выявил их меньшую высоту и большую точность формы по сравнению с образцом микросхемы с кремниевыми шинами. У алюминиевых шин края параллельны друг другу, не сужаются в центре рельефа. Ширина алюминиевой шины в верхней плоскости практически равна ширине у основания (рис. 2 б). Высота 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 другом. Таким образом, для алюминиевых шин, кроме меньшей высоты, характерна большая стабильность размеров. Высота рельефов SiO_2 , 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 2×2 мкм, чем у первого образца. АСМ хорошо фиксирует разрывы шин и дефекты их формы (рис. 2 в).

Таким образом, методами оптической, растровой и атомно-силовой микроскопии проведены исследования топографии поверхности тестовых матриц шин из поликристаллического кремния и алюминиевых, изготовленных по технологическим маршрутам серийно выпускаемых ИМС. Установлена эффективность метода АСМ в осуществлении метрологических измерений топологических слоев серийно выпускаемых ИМС, его неоспоримое преимущество перед оптической микроскопией и незаменимость в измерении высоты микрорельефа. Для определения латеральных размеров шин целесообразно дополнительное использование РЭМ.

По результатам была разработана концепция сканирующего зондового микроскопа с атомно-силовой и оптической функциями. Такой прибор, СЗМ-200, был разработан и изготовлен в рамках задания Государственной программы импортозамещения МПБ-06.13.

1. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 6. С. 405.
2. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. // Там же. 2000. Т. 29. № 1. С. 13.
3. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л., Демидов В. Н. // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С. 431.
4. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 3. С. 524.

Поступила в редакцию 01.04.11.

Владимир Александрович Пилипенко – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

Сергей Антонович Чижик – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор кафедры микро- и нанотехники БНТУ.

Владимир Васильевич Понарядов – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по экономике и инвестициям БГУ.

Татьяна Владимировна Петлицкая – кандидат технических наук, ведущий инженер Государственного центра «Бел-микроанализ» Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Татьяна Анатольевна Кузнецова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИТМО им. А.В. Лыкова.