

УДК 53.083.91

**КОМПЛЕКС ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СУБМИКРОННОЙ
ТОПОЛОГИИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

*Чижи́к С.А.¹, Басалаев С.П.², Пилипенко В.А.³, Худoley А.Л.¹,
Кузнецова Т.А.¹, Чикунoв В.В.¹, Суслoв А.А.⁴*

¹ Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

² ОАО «Оптоэлектронные системы», г. Минск, Республика Беларусь

³ НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь

⁴ ОДО «Микротестмашины», г. Гомель, Республика Беларусь

Описаны преимущества использования атомно-силовой микроскопии для контроля технологических процессов при изготовлении интегральных микросхем субмикронной электроники. Показана возможность визуализации морфологии поверхностей и профиля травления, оценки периодичности гребенок шин, определения стабильности размеров для одной шины. Выполнены работы по совмещению оптической и атомно-силовой микроскопии, разработан и изготовлен сканирующий зондовый микроскоп. Комплекс внедрен для промышленного неразрушающего контроля субмикронной электроники, выполненной на кремниевых пластинах диаметром до 200 мм, с целью осуществления операционного контроля, метрологических измерений и приемки качества готовой продукции. (E-mail: khudoley@hmti.ac.by).

Ключевые слова: контроль субмикронной топологии, оптическая и атомно-силовая микроскопия.

Введение

Тенденции развития микроэлектронной промышленности связаны с переходом к субмикронным и нанометровым топологическим нормам. Поэтому все большее применение находят методы и системы контроля качества продукции, основанные на совмещении различных методов микроскопии [1–3], что позволяет на практике сократить время и повысить точность измерения элементов структуры.

Оптическая микроскопия широко применяется в микроэлектронике. Метод позволяет наблюдать как большие участки кремниевой пластины, так и отдельные элементы интегральных микросхем (ИМС). В то же время оптическая микроскопия в основном используется для характеристики двумерных (плоских) объектов, так как не дает данных о высоте элемента структуры. В работе [4] показано, что посредством оптической микроскопии можно контролировать лишь грубые нарушения технологического процесса изготовления ИМС с субмикронными элементами,

так как метод не позволяет эффективно выявлять двумерную топологию размерами менее 0,5 мкм.

В этой связи использование метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) является перспективным для прецизионного контроля геометрических параметров отдельных элементов и небольших участков ИМС. Метод АСМ обеспечивает точную характеристику топологии трехмерных объектов. Однако подавляющее большинство атомно-силовых микроскопов позволяет изучать плоские образцы, размеры которых не превышают $40 \times 40 \times 10$ мм. В то же время существенной особенностью промышленного контроля качества выполнения отдельных операций является необходимость осуществления измерений топологии элементов на целой кремниевой пластине без ее разрезки.

Следует отметить, что АСМ практически не применима для анализа качества больших участков кремниевых пластин, так как имеет относительно невысокую скорость сканирования. Таким образом, необходимо совмещение двух взаимодополняющих методов микроскопии, что позво-

лит создать средство контроля, сочетающее возможности быстрого бесконтактного экспресс-контроля больших площадей кремниевой пластины (оптическая микроскопия) и точной контактной характеристики субмикронных элементов (АСМ).

Целью данной работы являлось создание специального контрольного оборудования для измерений топологии ИМС с субмикронными элементами, выполненными на крупногабаритных кремниевых пластинах, без разрезки пластины на отдельные образцы.

АСМ-контроль субмикронных элементов интегральных микросхем

Методические аспекты АСМ-контроля отрабатывались на специальных тестовых структурах, изготовленных по технологическим маршрутам серийно выпускаемых интегральных микросхем. Тестовые структуры представляли собой гребенки из шин поликристаллического кремния и алюминия на рельефном основании из SiO_2 , выполненном на подложке из монокристаллического кремния. При этом периодичность выполнения рельефа SiO_2 и шин варьировалась.

Установлено, что использование достаточно малых размеров полей сканирования – $6,5 \times 6,5$ мкм и менее совместно с построением профилей рельефа обеспечивает точную характеристику единичных элементов ИМС (рисунок 1). Высота рельефа SiO_2 , выполненного на подложке из монокристаллического кремния, составляет 370–380 нм. Высота продольного рельефа поверхности шины из монокристаллического кремния не стабильна. Так, высота краев шины по отношению к впадине в промежутке рельефа составляет 300 нм, а высота середины шины относительно этой же впадины – 200 нм, т.е. края шины приподнимаются над ее серединой на 150–170 нм. Ширина шины во впадинах рельефа составляет 400–500 нм по верхней поверхности и 1,3 мкм по нижней.

Алюминиевые шины по сравнению с поликристаллическими имеют меньшую высоту и большую точность формы (рисунок 2б). Края алюминиевых шин параллельны друг другу, не сужаются в центре рельефа. Ширина алюминиевой шины в верхней плоскости практически равна ширине у основания.

Результаты работ по трехмерной АСМ-визуализации структур ИМС, имеющих значительный перепад элементов по высоте и протя-

женные вертикальные участки, представлены на рисунке 2.

Таким образом, АСМ позволяет решить проблему контроля одной из ключевых операций субмикроэлектроники – проводить характеристику профиля травления ИМС; получать данные о морфологии поверхностей, например эмиттеров ИМС, для достижения требуемых параметров и оптимизации удельного сопротивления слоя; оценивать в целом периодичность выполнения гребенок шин, выполненных посредством металлизации, и определять стабильность размеров для одной шины.

При проектировании комплекса важно полноценно реализовать функцию АСМ без лимитирования возможностей оптического измерительного канала и обеспечить единство позиционирования оптической оси и острия зонда атомно-силового микроскопа. При этом конструктивная сложность заключается в перекрытии зондом части поля зрения. В этой связи предложено отводить из поля зрения зонд при выполнении оптического экспресс-контроля ИМС.

Проектирование и изготовление сканирующего зондового микроскопа (комплекса СЗМ-200)

Конструктивно комплекс, совмещающий два типа микроскопии, состоит из трех модулей: комбинированного измерительного узла, электронного блока управления и рабочего места оператора. Измерительный узел, включает, оптический канал, оснащенный двухкоординатным моторизованным столом, атомно-силовой модуль с трехкоординатным пьезосканером. Для надежной фиксации кремниевой пластины во время проведения измерений моторизованный стол оснащен вакуумным присосом. Основание измерительного узла выполнено в виде массивной гранитной плиты, установленной на четырех пневматических виброизолирующих опорах. Оптический канал контроля оснащен поворотной головкой со сменными объективами с возможностью автоматического зуммирования. Блок управления осуществляет обработку сигналов лазерной системы контроля положений зонда, управляет пьезодвигателями в трех координатах Z , X , Y ; осуществляет обработку сигналов емкостных преобразователей дополнительного контроля перемещений сканирующего стола; управляет шаговым приводом механизма Z фокусировки оптического канала (в момент

сближения зонда с образцом). Переход к функции АСМ осуществляется оператором при необходимости более детального пространственного

анализа геометрии структурного элемента интегральной микросхемы.

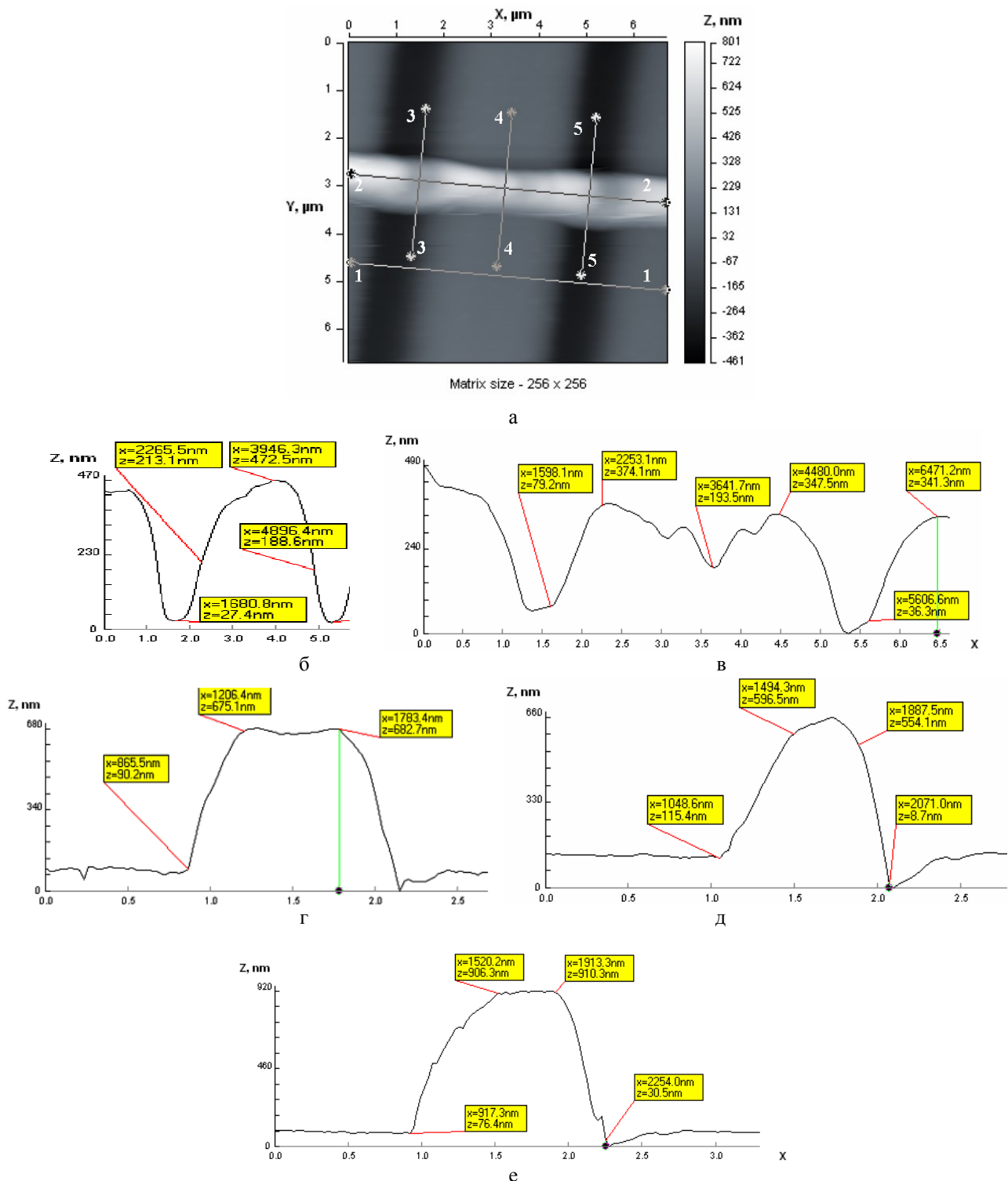


Рисунок 1 – АСМ-анализ топологии единичной шины из поликристаллического кремния на рельефном основании из SiO₂, выполненном на подложке из монокристаллического кремния: а – 2D АСМ-изображение шины; б – поперечный профиль основания и подложки (1-1, рисунок 1а); в – продольный профиль шины (2-2, рисунок 1а); г – поперечный профиль шины (3-3, рисунок 1а) до подложки; д – поперечный профиль шины (4-4, рисунок 1а) до основания; е – поперечный профиль шины (5-5, рисунок 1а) до подложки

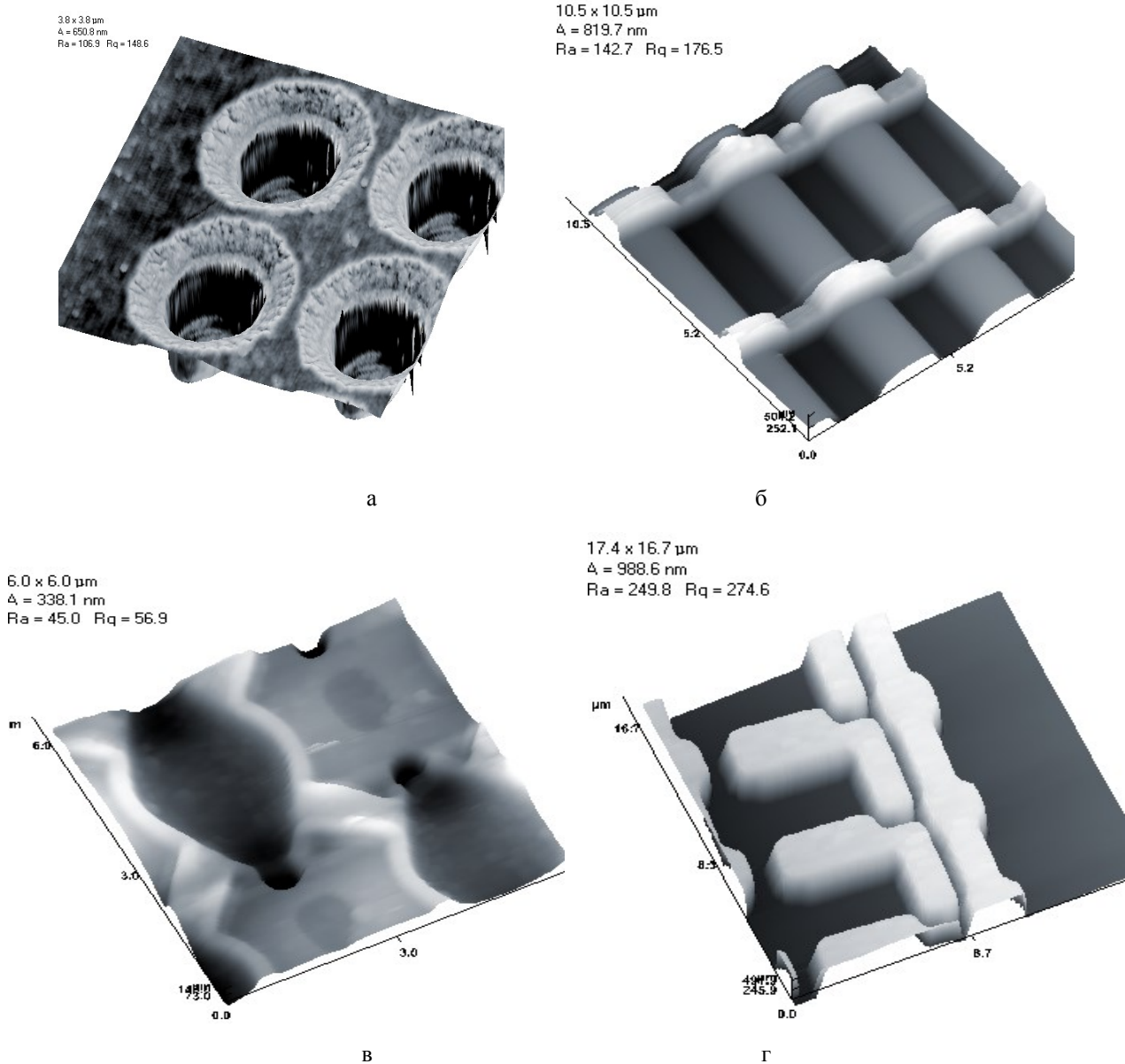


Рисунок 2 – 3D АСМ-изображения структур и элементов интегральной микросхемы: а – контактные окна, выполненные в монокристаллическом кремнии; б – алюминиевые шины на рельефном основании из SiO₂; в – интегральная микросхема с контактными окнами, субмикронными элементами и шинами; г – интегральная микросхема с шинами из поликристаллического кремния

Основные технические характеристики комплекса СЗМ-200: максимальный диаметр кремниевой пластины – 200 мм; разрешающая способность оптической системы – 0,4 мкм; диапазон перемещения моторизованного стола (X, Y) – 200 × 200 мм; разрешение моторизованного стола (X, Y) – 3 мкм; максимальный размер поля зондового сканирования (X, Y) – 90 × 90 мкм; диапазон сканирования по координате Z – 6 мкм; латеральное (X, Y) разрешение – 1–10 нм; вертикальное (Z) разрешение – 0,1 нм.

Разработанный и изготовленный сканирующий зондовый микроскоп совмещает функции оптического и атомно-силового (зондового) контроля субмикронных элементов. Оптический контроль используется для экспресс анализа микро- и макродефектов, оценки расположения отдельных ИМС и их массивов на кремниевой пластине. АСМ применяется для оценки толщин и качества морфологии поверхностей элементов ИМС, определения пространственного расположения гребенок из шин, установления геометрических параметров и дефектов при выполнении отдельных

субмикронных элементов. Предусмотрена возможность расширения функциональных возможностей комплекса электрическим, магнитным и микроволновым режимами, а также за счет использования автоматизированного загрузчика пластин.

Заключение

Разработан, изготовлен и внедрен специализированный сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ-200), совмещающий функции оптического и атомно-силового (зондового) контроля субмикронных элементов, обеспечивающий оперативный неразрушающий контроль качества интегральных микросхем на кремниевых пластинах диаметром до 200 мм.

Комплекс может применяться для обработки технологических операций при изготовлении интегральных микросхем, осуществления операционного контроля, метрологических измерений и приемки качества готовой продукции.

Список использованных источников

1. Сканирующий зондовый микроскоп, совмещенный с оптическим микроскопом: пат. 2244332 РФ, МПК G02B21/00 / А.В. Беляев, В.А. Быков, С.А. Саунин, Л.Г. Фюрст. – № 2002121274/28; заявл. 13.08.2002; опубл. 10.01.2005.
2. Сканирующий зондовый микроскоп-нанотвердомер, совмещенный с оптической системой линейных измерений: пат. на полезную модель 96429 РФ, МПК G01N3/42, G01N3/48 / К.В. Голининский [и др.]. – № 2010110686/22; заявл. 23.03.2010; опубл. 27.07.2010.
3. Scanning Probe Microscopy Special Issue // Microscopy and Analysis. – 2011. – No 133. – P. 25–34.
4. *Пилипенко, В.А.* Исследование топологии интегральных микросхем методом атомно-силовой микроскопии / В.А. Пилипенко [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: сб. докл. VII Междунар. семинара, Минск, 1–3 нояб. 2006 г. – Минск : Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2006. – С. 108–114.

Chizhik S.A., Basalaeв S.P., Pilipenko V.A., Khudoley A.L., Kuznetsova T.A., Chikunov V.V., Suslov A.A.

Equipment for nondestructive testing of silicon wafers submicron topology during the fabrication of integrated circuits

The advantages of using an atomic force microscopy in manufacturing of submicron integrated circuits are described. The possibilities of characterizing the surface morphology and the etching profile for silicon substrate and bus lines, estimation of the periodicity and size of bus lines, geometrical stability for elementary bus line are shown. Methods of optical and atomic force microcopies are combined in one diagnostic unit. Scanning probe microscope (SPM 200) is designed and produced. Complex SPM 200 realizes non-destructive control of microelectronics elements made on silicon wafers up to 200 mm in diameter and it is introduced by JSC «Integral» for the purpose of operational control, metrology and acceptance of the final product. (E-mail: khudoley@hmti.ac.by)

Key words: submicron topology control, optic and atomic force microscopy.

Поступила в редакцию 21.02.2013.