

ДИАГНОСТИКА ОТКАЗОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОГО ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

© 2011 г. А. Ф. Вяткин, В. И. Зиненко

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., Институтская ул., 6*

Поступила в редакцию 03.07.2010 г.
После доработки 21.10.2010 г.

Представлен способ вскрытия интегральных микросхем (и.с.) с фронтальной стороны для поиска возможных дефектов. Способ основан на применении физического ионного распыления и обеспечивает прецизионное послойное удаление материала и.с., позволяет открывать и исследовать каждый слой металлизации без возмущающего влияния соседних слоев. Обсуждаются основные принципы использования данного метода, конструкция экспериментальной установки, а также приведены результаты применения метода для анализа реальных и.с.

ВВЕДЕНИЕ

Современные интегральные схемы (и.с.) представляют собой многослойные многокомпонентные пространственно неоднородные (латерально и по глубине) структуры. На рис. 1 представлен поперечный разрез реальной современной микросхемы, сделанный остросфокусированным ионным пучком. И.с. содержит пять уровней металлической разводки, каждый из которых отделен

от соседнего слоем диэлектрической изоляции *1* и соединен с другим уровнем металлической разводки *2* или с активным слоем *3* соответствующим поперечным проводником *4*. Сверху интегральная схема покрыта пассивирующим слоем *5*. В состав компонентов, образующих микросхему, могут входить кремний, оксид кремния, нитрид кремния, алюминий, медь, вольфрам, нитрид титана, полиимиды и другие материалы. Характерный размер линий металлической разводки (вы-

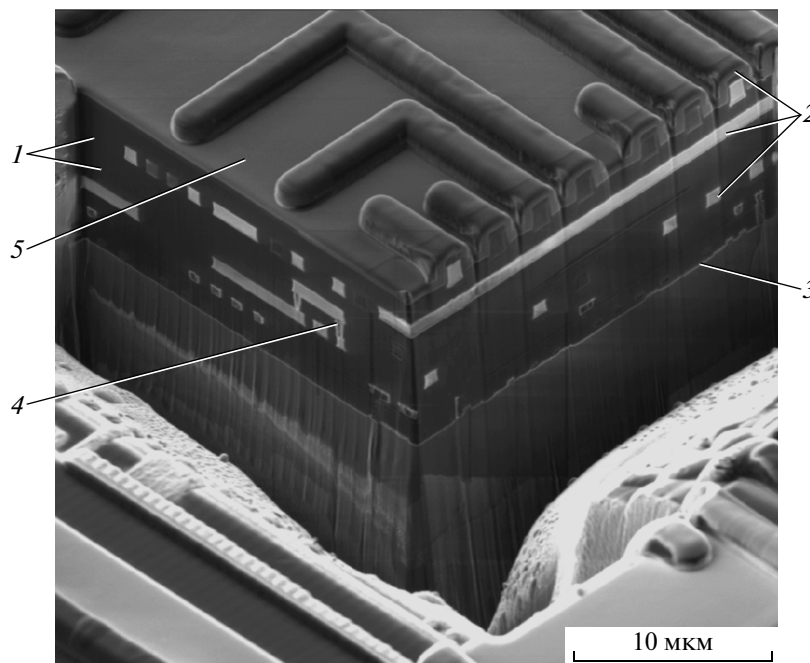


Рис. 1. Поперечный разрез реальной интегральной микросхемы, выполненный остросфокусированным ионным пучком. *1* – межслойная изоляция; *2* – слои металлической разводки; *3* – активный слой; *4* – поперечный проводник; *5* – пассивирующий слой.

сота, ширина), а также толщина диэлектрической изоляции между слоями составляет ~1 мкм.

Тенденции современного развития микроэлектроники требуют создания и внедрения в практику адекватных методов диагностики сверхбольших интегральных схем, в том числе методов анализа отказов микросхем, т.е. методов, позволяющих определить в готовых микросхемах дефекты, возникающие на стадии производства или в процессе их эксплуатации. Это привело к развитию в последние годы новых методов диагностики интегральных схем, получивших несколько названий: обратная инженерия (reverse engineering), анализ отказов (failure analysis), депроцессинг (de-processing), послойное профилирование микросхем (de-layering).

В частности, в задачу анализа отказов микросхем входит последовательное открытие (сверху вниз) слоев металлической разводки с целью определения возможных дефектов, сформировавшихся в процессе изготовления микросхемы. Наиболее часто встречающимися дефектами при производстве и.с. являются электрические закоротки и разрывы металлических соединений.

Известные методы вскрытия микросхем [1–3] включают в себя комбинации “сухих” и “мокрых” технологических процессов: селективное плазмохимическое травление, селективное химическое травление, механическую и химическую полировки. Каждый из этих методов, обладая рядом преимуществ, характеризуется также и присутствием ему недостатками, которые не позволяют решить все задачи послойной диагностики и.с.

Например, как следствие микроминиатюризации и.с., методы анализа отказов микросхем должны обеспечивать адекватную прецизионность вскрытия нанометровых структур, чего не удается добиться, используя стандартные методики. К тому же довольно проблематично совместить непрерывное наблюдение процесса послойного вскрытия и.с. в сканирующем электронном микроскопе (с.э.м.) в случае применения “мокрых” технологических процессов.

Процесс вскрытия и.с. должен включать в себя две стадии: планаризацию исходно неровной поверхности и.с. (высота неровностей ~1 мкм) и послойное удаление многокомпонентной планаризованной структуры параллельно исходной поверхности и.с. Цель данной работы – исследование возможности применения физического распыления ионными пучками для диагностики и.с.

Практическую полезность этого метода для диагностики и.с. демонстрирует применение остросфокусированных пучков ионов (рис. 1). Видно, что метод обеспечивает доступ к локализованным участкам и.с. в любой точке по глубине, но только в одной вертикальной плоскости сечения и.с. Физическое распыление ионными

пучками, в частности распыление при скользящих углах падения ионов, давно рассматривается как перспективная технология создания атомно-плоских поверхностей с высотой шероховатостей ~1 нм [4].

Для рассматриваемой в данной работе задачи диагностики и.с. при толщине линий металлической разводки ~1 мкм и наблюдения фронта травления и.с. в с.э.м. нет необходимости в получении таких гладких поверхностей. Допустима величина шероховатостей на уровне десятков нанометров. Главное, чтобы фронт травления перемещался параллельно поверхности и.с., а величина шероховатостей существенно не возрасла от слоя к слою.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

Процесс физического ионного распыления твердых тел характеризуется коэффициентом распыления $S(\beta)$, определяющим число распыленных атомов твердого тела в расчете на один упавший ион. $S(\beta)$ зависит от природы взаимодействующей пары ион – атом мишени, энергии первичного иона E , ядерной тормозной способности $s_n(E)$, угла падения иона на поверхность твердого тела по отношению к нормали к поверхности β , величины поверхностного энергетического барьера U_0 [5]:

$$S(\beta) = \frac{3\alpha s_n(E)}{4\pi^2 C_0 U_0} \frac{1}{(\cos\beta)^f}, \quad (1)$$

где α и C_0 – постоянные коэффициенты, $f = 1.7 - 1.0$ в зависимости от типа пары ион – атом.

Как отмечалось выше, на первой стадии вскрытия и.с. необходимо планаризовать исходно неровную поверхность и.с. Существование угловой зависимости коэффициента распыления, подобной (1) и приведенной на рис. 2, должно этому способствовать. Действительно, все элементы поверхности структуры и.с. (см. рис. 1), встречающие ионный пучок под такими углами, при которых коэффициент распыления максимален, будут распыляться с большими скоростями, чем те, которые встречают его или под углами, близкими к 0° (нормальное падение), или под углами, близкими к 90° (скользящие углы падения). Коэффициент распыления зависит также и от природы взаимодействующей пары ион – атом распыляемой мишени. Это означает, что неодинаковые по химическому составу области твердого тела будут распыляться с разными скоростями. Результатом такого различия в скоростях травления будет формирование пространственных неоднородностей (например, выступов на поверхности твердого тела).

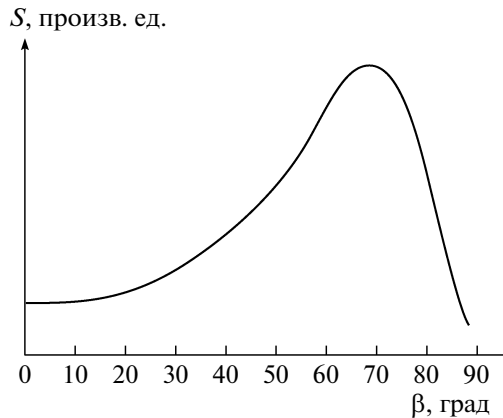


Рис. 2. Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов по отношению к нормали к поверхности твердого тела.

Образующиеся при распылении выступы на поверхности твердого тела будут устраняться так же, как и на исходной поверхности и.с., за счет больших скоростей травления фрагментов выступов, встречающих пучок ионов под углами, близкими к углам с максимальным коэффициентом распыления. В результате в процессе травления устанавливается динамическое равновесие, заключающееся в образовании и устранении топологических элементов на распыляемой неоднородной поверхности.

Ситуация, описанная выше, должна наблюдаться при скользящих углах падения ионов на поверхность и.с. Введение дополнительно вращения и.с. вокруг нормали к ее поверхности позволяет устранить эффект затенения областей и.с. вблизи выступов. Таким образом, распыление и.с. ионными пучками при скользящих углах падения ионов на поверхность и.с. и при условии вращения и.с. должно обеспечивать как планаризацию исходно неоднородной поверхности и.с., так и дальнейшее равномерное послойное травление и.с.

Приведенные рассуждения справедливы для простых однокомпонентных мишеней и подтверждаются на практике. В нашем случае поверхность и.с. представляет собой многокомпонентную структуру и имеет сложную топологию, образованную плотно упакованными линиями металлической разводки. Планаризация таких объектов раньше никем не исследовалась, и ответ на вопрос о степени планаризации такой сложной поверхности может дать только эксперимент.

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка для исследования процессов ионно-лучевого травления раз-

личных материалов и разработки технологии послойного удаления структурообразующих слоев кристаллов и.с. представляет собой вакуумную камеру с размещенными в ней источником ионов аргона и измерительным блоком. Измерительный блок включает в себя цилиндр Фарадея с входным отверстием $\varnothing 2$ мм для измерения плотности тока ионного пучка и держатель образца (и.с.).

Держатель представляет собой дюралевый диск $\varnothing 30$ мм со съемной вставкой, который крепится на валу миниатюрного двигателя постоянного тока ДПМ25-1Н. Двигатель и цилиндр Фарадея закреплены на поворотном водоохлаждаемом штоке с лимбом. Вращая шток, под пучок можно устанавливать поочередно или цилиндр Фарадея, или держатель с образцом по соответствующим меткам на лимбе.

Вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 700 л/с. Предельный вакуум в установке составляет $\sim 1.3 \times 10^{-4}$ Па, а рабочий вакуум (с работающим ионным источником) $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ Па.

Источник ионов аргона фирмы Oxford Instruments позволяет получать пучок ионов аргона с энергией 100–1500 эВ и токами пучка в десятки миллиампер при плотностях ионного тока до 1 мА/см² на мишени. Перед образцом установлена щелевая диафрагма шириной 4 и высотой 10 мм с целью уменьшения тепловой нагрузки на держатель образца.

Конструкция крепления держателя образца с вращающим его двигателем позволяет регулировать угол между плоскостью держателя и осью пучка в пределах 0–90°. Таким образом, есть возможность осуществлять ионно-лучевое травление как при нормальном, так и при скользящем падении пучка ионов на образец.

В данной работе исследовались образцы и.с. размерами 1 × 1 и 2 × 2 мм. Исследуемый кристалл и.с. крепился с помощью графитизированной двусторонней липкой ленты на вставку $\varnothing 10$ мм, помещавшуюся в посадочное гнездо держателя образца. На этой же вставке образец переносился для наблюдения в сканирующем электронном микроскопе JSM-850 или Zeiss EVO-50.

Процедура послойного удаления структурообразующих слоев и.с. заключалась в следующем: на поверхности и.с. выбирался участок размером 50 × 50 мкм и делалась его съемка в с.э.м., затем кристалл и.с. подвергался облучению пучком ионов аргона с фиксацией времени облучения. Снова делался снимок в с.э.м. этого же участка и.с. Время последующего облучения выбиралось после анализа результатов предыдущего облучения. Все эксперименты проводились при одних и тех же параметрах процесса ионно-лучевого травления: энергия ионов аргона 1000 эВ, плотность тока пучка на образце 0.5 мА/см², угол падения

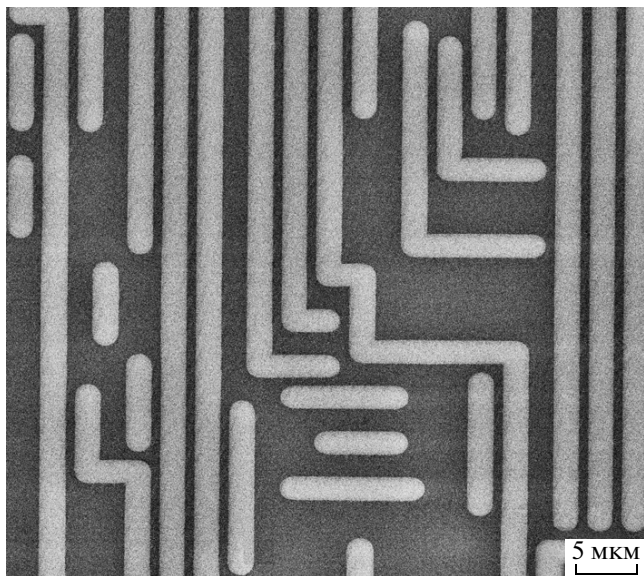


Рис. 3. Морфология поверхности интегральной микросхемы с пассивирующим слоем.

ионов на образец 85° , угловая скорость вращения образца 60 об/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходная поверхность и.с. представляет собой слой диэлектрической пассивации, осажденный на последний слой металлизации. Рельеф поверхности и.с. повторяет морфологию этого слоя металлизации (рис. 3). Поскольку для вскрытия и.с.

необходимо послойное удаление ее материала с целью открытия для наблюдения каждого последующего слоя металлизации, то на первом этапе необходимо при одновременном удалении слоя пассивации и первого слоя металлизации провести планаризацию поверхности микросхемы. При этом важно завершить процесс планаризации до достижения фронтом травления второго слоя металлизации. Только в таком случае при наблюдении в с.э.м. можно четко разделить структуру второго и следующего слоя металлизации.

Для оценки времени ионно-лучевого травления материала межслойной изоляции (в данном случае SiO_2) использовалось значение скорости травления 21 нм/мин, измеренное нами в работе [6]. Контроль времени травления был важен для того, чтобы не “проскочить” достижения фронтом травления второго слоя металлизации. Так как основным материалом многослойной структуры и.с. является SiO_2 , то, зная скорость травления, для любого момента времени можно было определить положение фронта травления в толще и.с.

На рис. 4 представлены изображения в сканирующем электронном микроскопе второго и третьего слоев металлизации и.с., исследуемой в данной работе. Линии на рисунке представляют собой полосы алюминиевой металлизации, а точки на концах этих линий – сечения вольфрамовых столбиков, выполняющих функции межслойных проводников. Приведенные на этом рисунке изображения сняты практически с одного и того же места и.с., о чем свидетельствуют отмеченные точки (1 и 2), относящиеся к одним и тем же элементам и.с. При этом точки с меньшим уровнем

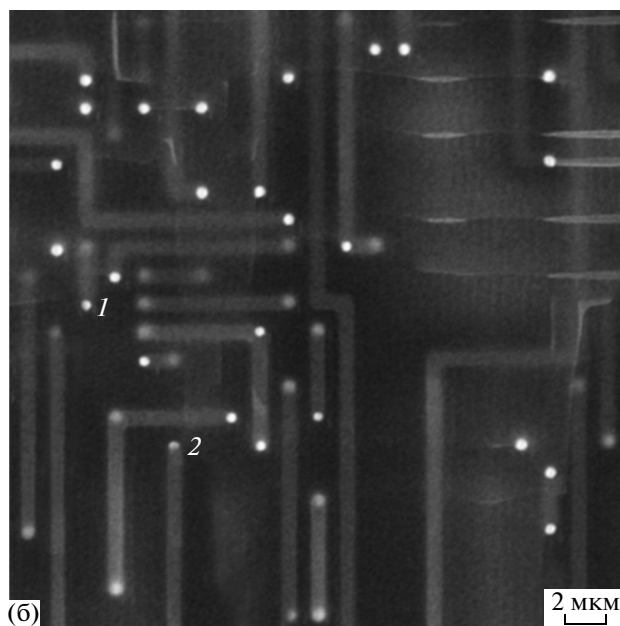
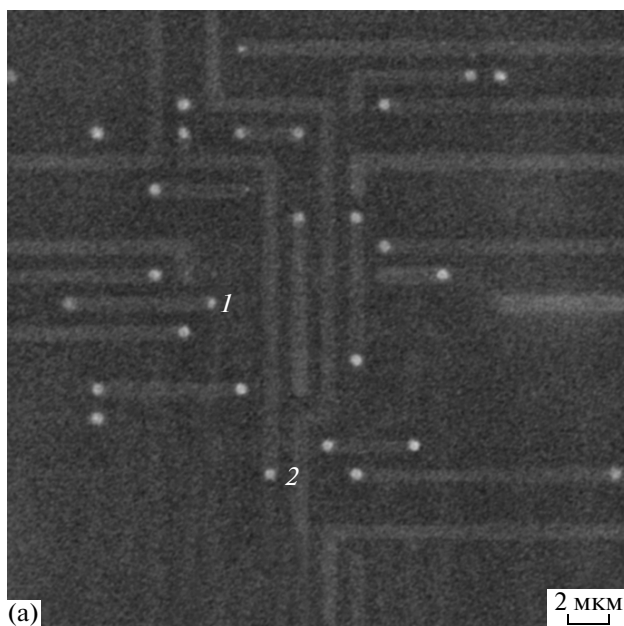


Рис. 4. Изображение в сканирующем электронном микроскопе второго (а) и третьего (б) слоев металлизации.

яркости относятся к проводникам, уходящим к более глубокому слою металлизации, а с большей яркостью — к проводникам, приходящим от вышележащего слоя металлизации.

На рис. 4а представлено изображение второго слоя металлизации, когда фронт ионного травления достиг, как минимум, середины этого слоя. Об этом свидетельствует то, что все изображения межслойных вольфрамовых проводников (точки на рис. 4) характеризуются слабым контрастом. Последнее означает, что эти изображения сформированы от столбиков, уходящих от второго слоя металлизации к третьему и закрытых сверху полосками алюминия второго слоя металлизации. На рис. 4б присутствуют точки как со слабым контрастом, так и с ярким. Первые из них относятся к проводникам, уходящим из третьего слоя металлизации, изображение которого в виде линий алюминиевой разводки отражено на рис. 4б, к четвертому слою металлизации. Точки с ярким контрастом относятся к остаткам межслойных проводников, идущих из второго слоя металлизации к третьему слою. Следует отметить, что изображение и.с. на рис. 4а получено после 2 ч 5 мин травления при указанных выше параметрах. За это время удалено примерно 2.65 мкм материала межслойной изоляции, что согласно данным рис. 1 соответствует расположению фронта травления на втором уровне слоя металлизации. Изображение на рис. 4б получено после 2 ч 48 мин травления, т.е. после удаления примерно 3.6 мкм материала межслойной изоляции, что соответствует достижению фронтом травления верхнего уровня третьего слоя металлизации.

Совпадение расчетных данных положения фронта травления и снимков в с.э.м. с местоположением слоев металлизации (см. рис. 1) свидетельствует о движении фронта травления параллельно исходной поверхности и.с. Отсутствие на снимках рис. 4 интерференции с соседними слоями говорит о том, что степень планаризации по-

верхности при травлении достаточна для наблюдения слоев металлизации в с.э.м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность использования метода физического ионного распыления при скользящих углах падения ионов для прецизионного контролируемого профилирования твердых тел, существенно неоднородных по составу, характеризующихся развитой исходной топологией поверхности. В частности, этот метод может быть применен для исследования отказов в слоях металлизации современных интегральных микросхем.

Авторы выражают благодарность К.К. Фролову, А.И. Ильину и О.В. Трофимову за плодотворные обсуждения материалов статьи, подготовку образцов и проведение анализов по исследованию морфологии поверхности и.с. в ходе ионно-лучевого травления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mathews C.R., Bierway A., Litwin S.* // Copper process methodology. Patent US 0153185A1. 2008.
2. *Ku Jung Hwoi, Kim Chuel Hang* // Deprocessing method of defect analysis of polysilicon contact. Patent KR 100216674(B1). 1999.
3. *Tichonov V.* // Apparatus and method for deprocessing a multi-layer semiconductor device. Patent US 6033994A. 2000.
4. *Wißing M., Batzill M., Snowdon J.* // Nanotechnology. 1997. V. 8. P. 40.
5. *Sigmund P.* // Phys. Rev. 1969. V. 184. P. 383.
6. *Зиненко В.И., Вяткин А.Ф., Агафонов Ю.А., Пустовит А.Н.* // Труды 19 Международной конференции “Взаимодействие ионов с поверхностью” (21–25 августа 2009, Звенигород, Россия). Elsevier, 2009. Т. 1. С. 122.