

УДК 621.3.049.772.1

*И. Н. Чебурахин, Д. И. Нефедьев***ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
ТЕНЗОСТРУКТУР МДМ***I. N. Cheburakhin, D. I. Nefed'ev***QUALITY EVALUATION
OF THIN FILM TENZOSTRUKTUR MDM**

А н н о т а ц и я. Представлены результаты исследований способов оперативной оценки качества тонкопленочных тензоструктур в системе «металл – диэлектрик – металл» (МДМ), полученных методом распыления в вакууме на металлических подложках – упругих элементах (УЭ), используемых для изготовления датчиков давления. Показано, что предложенные решения при значительном сохранении времени и затрат позволяют оценивать дефектность (раковины, поры, инородные включения и др.) как на рабочей поверхности отполированного УЭ, так и послойно в тонкопленочной структуре МДМ на этапах отработки технологии, а также при анализе некондиционных ЧЭ (техотхода), появляющихся в процессе производства.

A b s t r a c t. Research methods for rapid assessment of quality of thin-film tenzostруктур in metal-insulator-metal (MDM) obtained by the method of spraying in vacuum on metal substrates-elastic elements (UE) used for the manufacture of pressure sensors. Shown that the proposed decision with significant saving of time and costs to evaluate defect density (sinks, pores, foreign and others) as a working surface polished, UE and in layers in thin film structure MDM technology phases, and analysis of the non-conditioned Jae (tehothoda), appearing in the production process.

К л ю ч е в ы е с л о в а: упругий элемент (УЭ), чувствительный элемент (ЧЭ), диэлектрик, напыление, схема, полировка, поры, раковины, включения, изоляция, дефекты.

К е у w o r d s: elastic element (UE), the sensitive element (CHE), dielectric, sputtering, scheme, polished, pores, sinks, inclusion, exclusion, defects.

Одним из важных требований к качеству сформированной схемы является отсутствие таких дефектов, как раковины, поры, инородные включения и т.д., влияние которых особенно проявляется при воздействии механических и температурных (электрических) нагрузках, а также с течением времени в форме отказов: медленное и скачкообразное изменение начального разбаланса, потеря сопротивления изоляции, пробой диэлектрической пленки [1, 2].

Используемые традиционные методы контроля – внешний вид, сопротивление изоляции, диэлектрические потери, величина разброса резисторов на каждом ЧЭ, ТКС – не позволяют полностью оценивать и прогнозировать степень влияния дефектов во времени на работоспособность ЧЭ, поэтому часть сборок приходится отбраковывать на этапах технологических тренировок при изготовлении датчика.

Целью данной работы является нахождение решения по оперативной оценке степени дефектности (в том числе скрытых дефектов) в тонкопленочных структурах, позволяющих их обнаруживать на любом уровне структуры, находить причины и принимать меры по корректирующим действиям [3].

Объект исследования

В работе используются ЧЭ, отошедшие по несоответствию параметров в отход, специально изготовленные экспериментальные образцы с принятыми корректирующими мерами. Рассматриваемые характерные дефекты в структуре образца представлены на рис. 1.

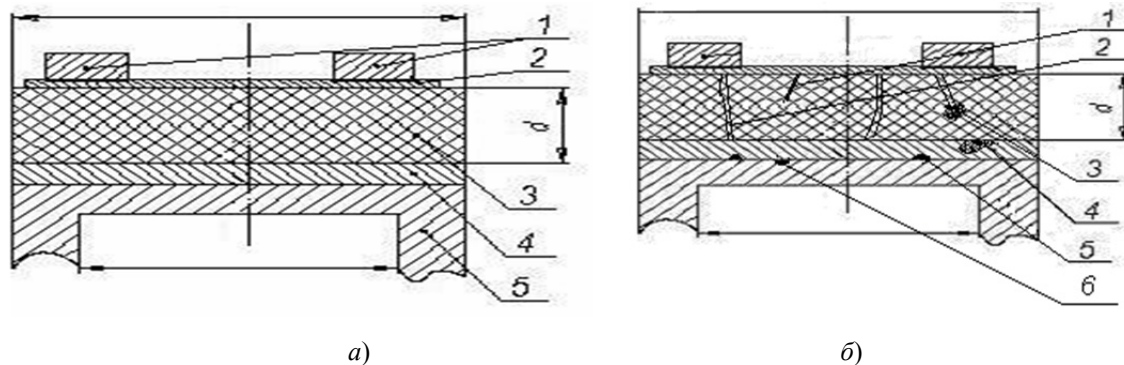


Рис. 1. Схема тонкопленочной гетероструктуры в разрезе (а):

1 – контактные площадки; 2 – тензорезистор; 3 – слой диэлектрика толщиной d ; 4 – буферный адгезионный подслой; 5 – мембрана из специального сплава (13, 14 класс шероховатости); характерные дефекты (б): 1 – микротрещины; 2 – сквозные микропоры (каналы проводимости); 3 – несовершенства диэлектрической пленки (включения частиц испаряемого материала); 4 – загрязнение (сажа); 5 – карбонитриды, инородные включения на УЭ; 6 – раковины, поры на УЭ

На рабочей отполированной поверхности УЭ (подложке, например из 36НХТЮ, ВУС – 22), несмотря на высокий базовый класс обработки, имеются различного рода дефекты, связанные со спецификой получения металла и его обработки (раковины, поры, термические и механические микротрещины, карбонитриды и другие неметаллические включения), а также привнесенные полируемыми материалами (дисперсными порошками). Имеет место неравномерное распределение исходных дефектов по длине используемого проката.

В процессе полирования, из-за пластических деформаций поверхностного слоя, часть таких дефектов (раковины, поры, микротрещины, мелкие включения и др.) заполировываются («замуровываются») и переходят в разряд невидимых, что снижает визуальный эффект обработки УЭ. Они появляются, вскрываются на дальнейших операциях технологического цикла изготовления ЧЭ, где используются высокотемпературные обработки, что приводит к значительным непроизводительным затратам: отбраковка ЧЭ со сформированными тонкопленочными структурами.

Кроме этого, все оговоренные дефекты влияют на характер и условия формирования тонкопленочных структур: несплошность и разнотолщинность пленок, разнотолщинность, появление локальных механических и термических напряжений, микро- и макропоры и т.д.

В дальнейшем это сказывается на перегреве резисторов, разбросе значений температурных коэффициентов сопротивления между собой (отход по температурной погрешности), низкой стойкости диэлектрической пленки электрическим нагрузкам (потеря $R_{из}$, локальный пробой до УЭ с разрушением элементов схемы), нестабильности выходного сигнала мостовой схемы из-за разностойкости резисторов к воздействующим факторам при изготовлении и аттестации датчиков.

При изготовлении ЧЭ (формирование гетероструктуры на подложке), наряду с вышесказанным, появляются новые виды дефектов в тонких пленках, приводящих к нестабильности параметров и отказам:

- наличие возможных локальных органических и пылевых загрязнений после очистки УЭ и между наносимыми слоями (при перезарядке ЧЭ из одной вакуумной установки в другие);
- наличие частичек испаряемых методом сублимирования материалов хрома и монооксида кремния;
- пористость диэлектрической пленки (и как следствие разнотолщинность резисторов и их несплошность) из-за специфики ее формирования.

Экспериментальные исследования

1. Анализ качества рабочей поверхности УЭ. Несмотря на традиционные методы проверки качества металла – определение на специально подготовленных образцах (шлифах) для полученной партии металла (сплава) структуры, загрязненности и неметаллических включений, – в отдельных случаях наблюдаются зоны в прутках с повышенной дефектностью, в том числе скрытой, проявляющихся в процессе проведения доводочных и полировальных операций.

Получение заданного класса шероховатости обеспечивается ступенчатой обработкой УЭ: от 5 мкм (карбид кремния) – до финишной с 0,5–1 мкм (алмазный порошок). В случае явно выраженного отхода УЭ используется оперативный анализ методом форсированного нагрева отполированной и очищенной рабочей поверхности УЭ. Нагревательный плоский элемент (электрическая плитка) доводится до температуры начала покраснения (500–600 °С, определяется визуально). УЭ рабочей поверхностью устанавливается в зону нагрева и выдерживается в течение 10–30 мин в зависимости от его габаритно-массовых размеров.

За счет окислительных процессов вся поверхность окрашивается в цвета, свойственные каждому компоненту сплава. При этом четко проявляются структура металла, форма, размеры и границы зерен («калейдоскоп»), дефектные места (раковины, поры, карбонитриды и др.). В тех местах, где поры были явно не выражены или заполировались, с наличием полировального материала из-за быстрого нагрева они вскрываются взрывным испарением проникшей в них эмульсии, что могло бы проявиться во время воздействия температур при изготовлении ЧЭ (рис. 2).

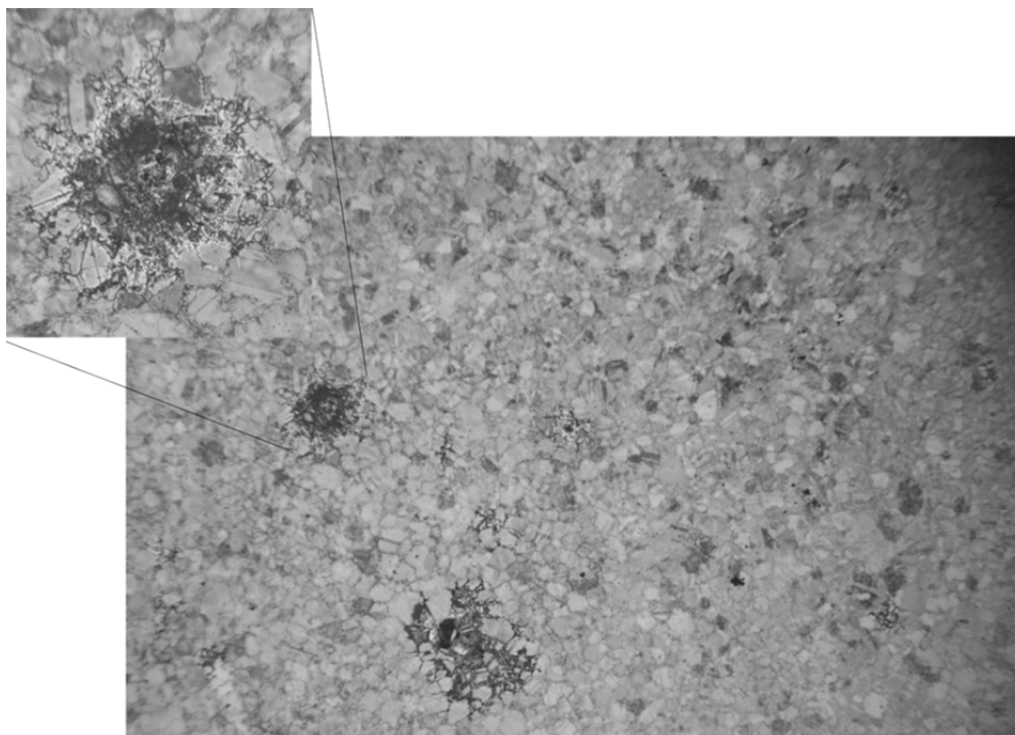


Рис. 2. Структура сплава УЭ после нагрева на электрической плитке и дефект на рабочей поверхности

В случае критичности выявленных дефектов проводится дополнительный анализ прутков по выборочным зонам и принимается решение по их дальнейшему использованию.

На контрольных образцах из запускаемой партии металла дополнительно можно оценивать характер и качество осаждаемой пленки, используя для этого маскирующие нанометровые слои технологического покрытия из SiO_2 или SiO , нанесенные по режимам рабочей технологии напыления в вакууме.

По ним определяется плотность (сплошность) напыленной пленки и оцениваются места и характер дефектов в местах неформирования при увеличении до 800*, в том числе с использованием далее рассмотренных методов анализа. Допускаются дефекты на рабочей поверхности УЭ не более 3 шт., размером не более 20 % от ширины резистора (15–30 мкм в зависимо-

сти от параметров датчика давления, для которого изготавливается УЭ). Если эти условия не выполняются, принимаются технические решения по необходимости замены материала, усовершенствованию технологии полирования или разработке специальной технологии, обеспечивающей с ростом толщины диэлектрической пленки эффект «запечатывания» пор.

2. Анализ качества резистивной пленки. Для оценки влияния скрытых, неявно выраженных дефектов на параметры тонкопленочных резисторов (локальное утонение, наличие несплошности) и для проверки воспроизводимости отработанной технологии используется метод глубокого плазменного окисления в кислородной среде.

В качестве объекта исследования использовались чувствительные элементы датчика давления Вт 212.

Условно разделив общее количество ЧЭ, участвующих в работе, на пять групп с разбросами сопротивлений ΔR : 0–10 Ом, 10–20 Ом, 20–30 Ом, 30–40 Ом, 40–50 Ом, по результатам испытаний можно построить диаграмму изменений сопротивлений резисторов. После обработки в кислородной плазме количество ЧЭ с максимальным разбросом сопротивлений резисторов уменьшается (рис. 3). Это вызвано тем, что за счет глубокого окисления утоненные места, потенциальные источники отказов, окисляются на всю толщину и не участвуют в токовой проводимости резисторов, что сказывается на уменьшении ΔR на ЧЭ.

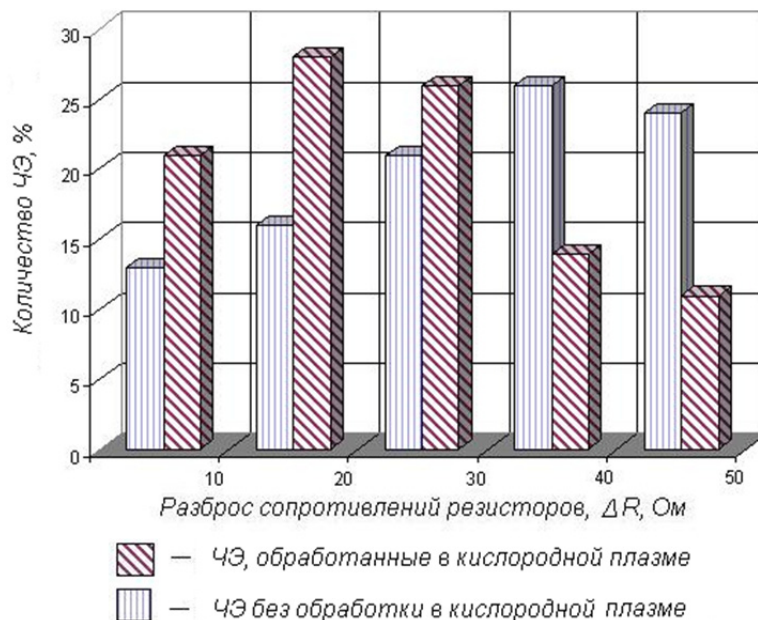


Рис. 3. Диапазоны изменений значений резисторов в процессе испытаний

Утоненные участки с минимальной проводимостью резистивной пленки формируются на дефектных местах, таких как рельефность подложки и диэлектрика (на раковинах, порах, инородных включениях), которые не были выявлены ранее, и являются причиной перегрева и локального теплового излучения. В результате обработка в кислородной плазме исключает влияние скрытых случайных дефектов на электрические параметры тензорезистивной пленки и способствует выравниванию ТКС, приближая его значение к исходному значению материала резистора (Х20Н75Ю, П65ХС).

В рабочей технологии используются более мягкие режимы плазменной обработки («компромиссные»), так как глубокое окисление с использованием кислорода приводит к неуправляемым процессам при росте окисной пленки как на нихромовых резисторах, так и в диэлектрике (превращение SiO в SiO_2 и т.д.), что может приводить к появлению напряженного состояния тонкопленочной структуры, термическим микротрещинам и локальным отслоениям, возможной временной нестабильности и отказам. Такие процессы (глубокое окисление) в условиях работы датчика не происходят.

Кислородная плазма может применяться помимо повышения стабильности значений сопротивлений тензорезисторов как метод анализа, который позволяет оценивать общее состояние ка-

чества резисторов, так как на них отражены влияние вышеописанных дефектов диэлектрика и УЭ, а также собственные дефекты резистивной пленки (разнотолщинность, фазовый состав, структура и т.д.). По полученным данным (разбросу значений тензорезисторов до и после обработки в кислородной плазме) можно судить о типе дефектов в тензорезистивной пленке и при необходимости принимать оперативные меры по всей технологической цепочке.

3. Анализ качества диэлектрической пленки. Как уже отмечалось ранее, дефектность диэлектрической пленки, кроме собственной, во многом определяется дефектностью отполированной поверхности УЭ, качеством очистки. Поэтому оценке подвергается УЭ, демпфирующий подслоу из хрома, сам диэлектрик, а также характер их влияния на резисторы и коммутационные дорожки в сформированной схеме.

Общая толщина структуры Cr – SiO и Cr – SiO – SiO₂ на использованных образцах достигает 3,5–5 мкм.

Принцип анализа основан на использовании капиллярного эффекта, исходя из предположения, что в пленке диэлектрика над дефектным местом образуется воздушный канал, выходящий на ее поверхность. В зависимости от размера выходное отверстие при контроле под микроскопом в прямом свете выглядит как темная микроточка или в форме поры (в зависимости от того, происходило ли с ростом толщины пленки его зарастивание или наоборот). При таких размерах отличить канал проводимости от микрозагрязнения (например, «сажа» от монооксида кремния при нарушении лабиринтного прохождения потока из-за температурной деформации испарителя) практически невозможно. Однако выявление и недопущение каналов проводимости, особенно до подслоя хрома или УЭ, актуальны, так как они мгновенно заполняются капиллярной жидкостью (любая влажность в гермозоне, «точка росы» при термоциклах) и приводят к отказам по потере сопротивления изоляции или пробоем с разрушением элементов схемы.

По выявлению каналов проводимости и других дефектов задействованы разные варианты, так как они отличаются своими разрешающими возможностями. К ним относятся:

- воспроизведение процесса электролиза;
- воздействие химически активными травителями (хрома, никеля);
- послойное стравливание диэлектрика SiO в горячей щелочи (для определения промежуточных дефектов в слоях);
- форсированное испарение жидкости из пор (растворимые загрязнения);
- провоцирование пробоя при $U = 10 \text{ В}$, 100 В , в том числе с использованием жидкости.

Рассматриваемые методы позволяют оценить характер и место дефектов в тонкопленочной структуре или на промежуточных операциях напыления, или на готовом ЧЭ, со сформированной схемой.

Суть метода определения сквозных пор (каналов проводимости) заключается в воспроизведении процесса электролиза между металлом (УЭ) через диэлектрический слой и технологической проводящей обкладкой, в данном случае водой, с целью повышения эффекта.

На диэлектрическую пленку наносится капля воды так, чтобы не было поверхностного контакта с УЭ. Устанавливаются медные электроды, как показано на рис. 4, и подается напряжение питания (10 В или 100 В в зависимости от степени дефектности). Если имеется сквозная пора до металла, то начинается перенос с образованием четкой картины на диэлектрической пленке (рис. 5) – круглое пятно с темной точкой в центре (порой). Там, где имеются несквозные дефекты (включения частичек испаряемого материала и др.), этого процесса не происходит.

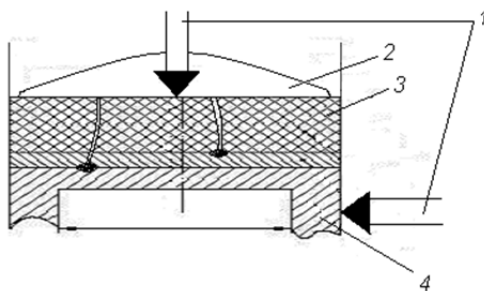


Рис. 4. Определение дефектности диэлектрической пленки:
1 – медные электроды; 2 – капля воды; 3 – пленка диэлектрика; 4 – УЭ

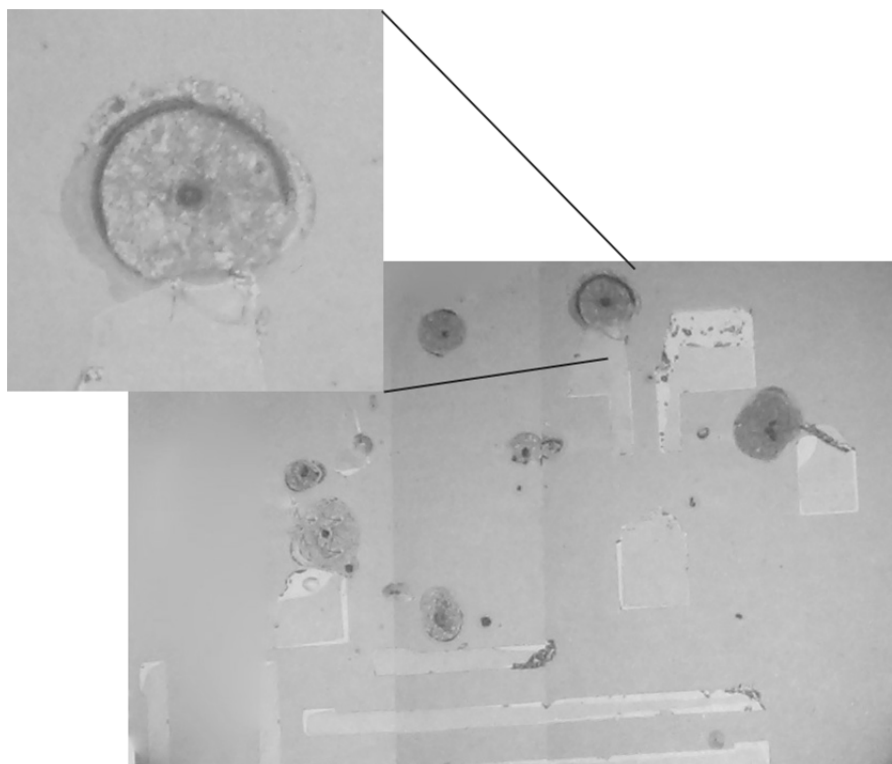


Рис. 5. Процесс электролиза через сквозную пору (черная точка в центре)

Аналогичные результаты получают при воздействии хромового травителя на ЧЭ, при этом УЭ бракуется (растворяется), а в рассматриваемом методе передается на реставрацию (переполіровку) с переводом в другой диапазон измерения.

Анализ причин несквозных дефектов проводится с использованием послойного травления SiO в горячем растворе щелочи.

Как показали экспериментальные данные, плотность дефектов распределяется по разному, индивидуально по каждому ЧЭ, что говорит о случайном характере их появления. При этом размеры скрытых дефектов колеблются от домикронного уровня до 30 мкм. Основная масса образцов не имеет сквозных дефектов.

Список литературы

1. Ефремов, Д. А. Системы контроля многофункциональных СБИС / Д. А. Ефремов // Проблемы информатизации и управления : сб. науч. тр. – М., 1996.
2. Малышева, И. А. Технология производства интегральных микросхем / И. А. Малышева. – М. : Радио и связь, 1991.
3. Смирнов, Н. И. Оценка безотказности интегральных микросхем / Н. И. Смирнов, В. Б. Широков // Библиотека инженера надежности. – М. : Радио и связь, 1983.

Чебурахин Игорь Николаевич

начальник цеха 54,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: niifi@sura.ru

Cheburakhin Igor' Nikolaevich

chief of shop 54,
Scientific-research Institute
of physical measurements

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники,
Пензенский государственный университет
E-mail:iit@pnzgu.ru

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

doctor of technical sciences,
head of sub-department
of information and measuring equipment,
Penza State University

УДК 621.3.049.772.1

Чебурахин, И. Н.

Оценка качества тонкопленочных тензоструктур МДМ / И. Н. Чебурахин, Д. И. Нефедьев //
Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3 (5). – С. 54–60.