

УДК 621.315.5

Влияние условий напыления на микроструктуру пленок индия

Н. В. Кардонов, Е. А. Климанов, А. В. Ляликов, Ю. С. Мезин,
М. В. Седнев, Б. В. Трошин, Ю. П. Шаронов

Представлены результаты исследования влияния чистоты исходной поверхности, давления остаточных газов в вакуумной камере, скорости напыления и других факторов на микрокристаллическую структуру слоев индия.

PACS: 85.40.-e

Ключевые слова: микроструктура, пленки, вакуумная камера, индий, остаточные газы.

Введение

Микроструктура поликристаллических пленок металлов существенно влияет на их свойства, в том числе на твердость, скорость и однородность процессов их травления, что определяет важность управления этим параметром.

Индий в настоящее время является основным материалом, используемым для изготовления микроконтактов в изделиях микрофотоэлектроники. Исследование зависимости микроструктуры его слоев от условий их получения, являющееся целью настоящей работы, имеет важное значение для понимания влияния этих условий на последующие процессы формирования микроконтактов из индия.

Эксперимент

Слои индия напылялись на различные подложки (кремний, кремний, покрытый слоем фоторезиста) методом термического испарения.

Процессы напыления проводились на вакуумных установках резистивного испарения. Кремниевые пластины, закрепленные на загрузочной кассете из алюминиевого сплава, располагали на охлаждаемом водой (10—20 °С) медном подложкодержателе. Скорость осаждения слоев индия за-

давали величиной тока, протекающего через испаритель.

Напыление индия проводилось резистивным испарением навески массой, соответствующей требуемой толщине слоя, из лодочки специальной конструкции. Для изготовления испарителя использовался молибден или тантал.

Толщина слоев составляла 8—11 мкм. Удельное сопротивление контролировали четырехзондовым методом. Толщины слоев индия измеряли на контактном профилометре, шероховатость поверхности — на конфокальном оптическом профилометре. Контроль морфологии поверхности образцов осуществляли на растровом электронном микроскопе (РЭМ) типа SEM 515 с ускоряющим напряжением до 30 кВ.

После напыления слоев часть поверхности образцов защищали фоторезистом и проводили травление индия до подложки. На полученных таким образом поперечных сечениях слоев исследовалась их структура с помощью РЭМ.

Результаты измерений Шероховатость поверхности

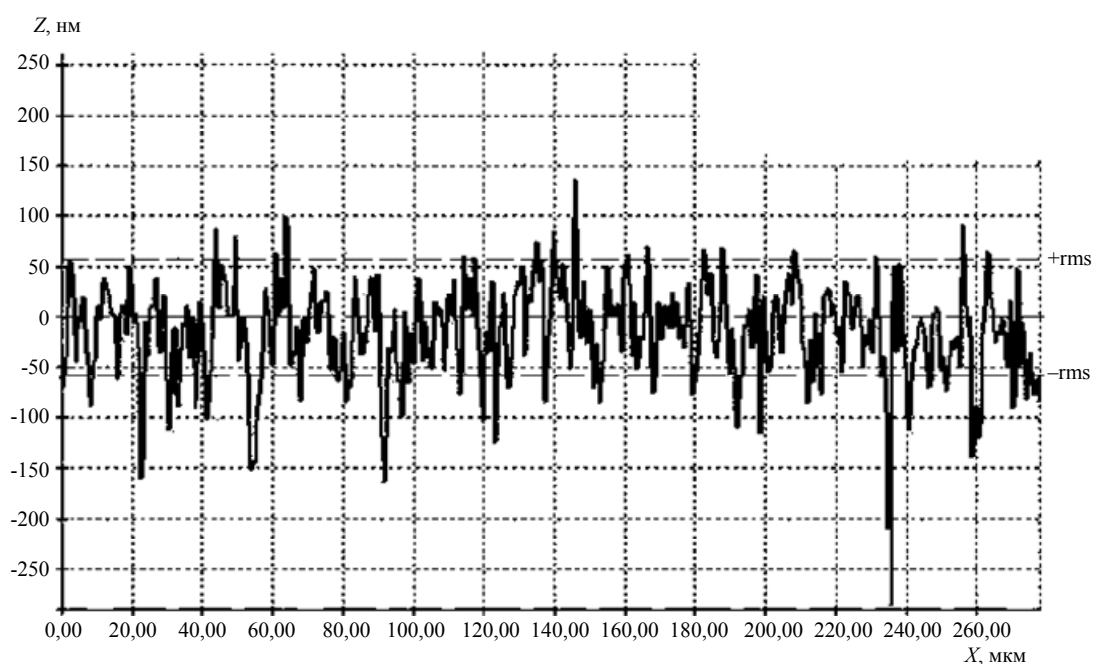
Результаты экспериментов, приведенные в таблице, позволяют определить основные параметры процесса напыления, влияющие на морфологию поверхности слоев индия, качественно характеризуемую ее шероховатостью. Степень шероховатости качественно оценивалась в следующих терминах: зеркальная поверхность, полуматовая и матовая. На рис. 1 приведены профилограммы образцов с зеркальной и матовой поверхностью, характеризующимися средними значениями шероховатости R_a для них 0,01 мкм и 1,0 мкм, соответственно.

Кардонов Никита Владимирович, инженер.
Климанов Евгений Алексеевич, главный научный сотрудник.
Ляликов Алексей Владимирович, вед. инженер.
Мезин Юрий Сергеевич, ведущий инженер.
Седнев Михаил Васильевич, начальник участка.
Трошин Богдан Васильевич, инженер-технолог 1-й категории.
Шаронов Юрий Павлович, ведущий инженер.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

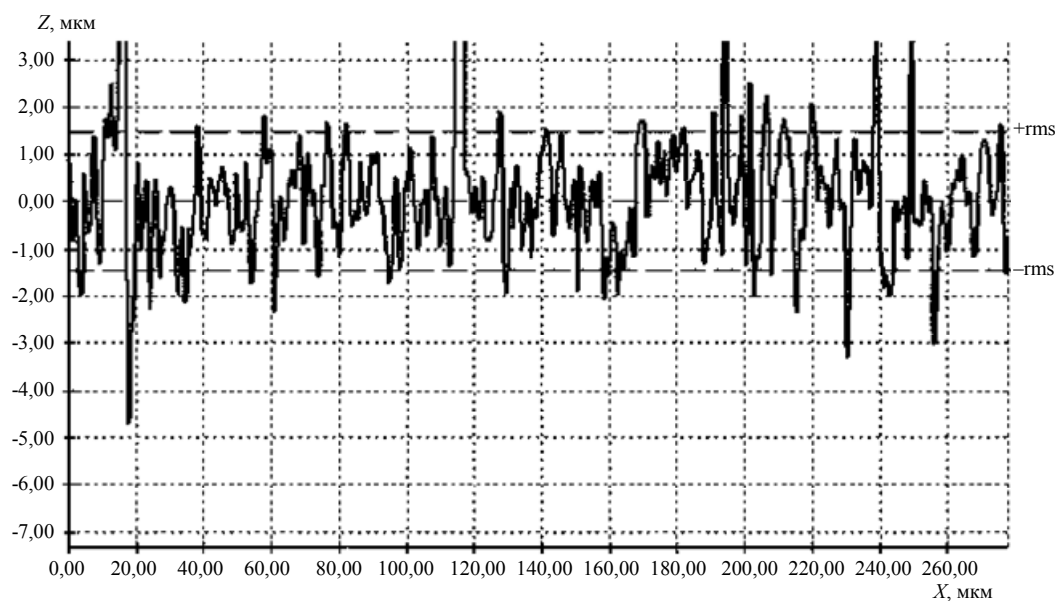
Статья поступила в редакцию 29 октября 2011 г.

© Кардонов Н. В., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Мезин Ю. С., Седнев М. В., Трошин Б. В., Шаронов Ю. П., 2012

№	Скорость осаждения, мкм/мин	Давление в камере, Торр	Газовая среда в камере	Толщина слоя, мкм	Шероховатость поверхности
1—1	0,4	$1,5 \cdot 10^{-5}$	—	8	Матовая
1—2	0,8	$3 \cdot 10^{-6}$	—	2,30	Полуматовая
1—3	1,0	$3 \cdot 10^{-6}$	—	3	Зеркальная
1—4	2	$3 \cdot 10^{-6}$	—	10	"
1—5	4	$3 \cdot 10^{-6}$	—	4	"
1—6	2	$1,5 \cdot 10^{-5}$	—	8,2	Полуматовая
2—1	0,8	10^{-5}	Ag	3	"
2—2	4	10^{-5}	Ag	4	"
2—3	4	10^{-4}	Ag	3,5	"
3—1	0,5	10^{-5}	O ₂	1,7	Матовая
3—2	1	10^{-5}	O ₂	2,7	"
3—3	2	10^{-4}	O ₂	2,36	Полуматовая
3—4	4	10^{-5}	O ₂	3,8	"



a



б

Рис. 1. Профилограммы поверхности образцов с зеркальной (а) и матовой поверхностью (б)

Скорость напыления

Сравнение данных для образцов иллюстрирует уменьшение шероховатости при увеличении скорости напыления. Измерение шероховатости поверхности индия показало, что она уменьшается от 1,5 мкм при скорости напыления 0,2 мкм/мин до 50 нм с увеличением скорости напыления до 1 мкм/мин. Из спектров отражения было определено, что слой, напыленный со скоростью 1 мкм/мин, отражает от 80 до 99 % падающего излучения (зеркальная поверхность), тогда как напыление со скоростью 0,2 мкм/мин формирует слой индия с отражением ~10 % в диапазоне волн до 6 мкм (матовая поверхность).

Содержание примесей в вакуумной камере

Добавление в вакуумную камеру небольших количеств кислорода при сохранении неизменной скорости напыления приводит к резкому увеличению шероховатости поверхности (матовая поверхность). Примесь аргона также повышает шероховатость, но в меньшей степени (полуматовая поверхность).

Давление в вакуумной камере

Снижение давления в вакуумной камере приблизительно на порядок (от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ Торр) при постоянной скорости осаждения и отсутствии специально вводимых примесей (кислород, аргон) также значительно увеличивает шероховатость поверхности.

Морфология поверхности

На рис. 2 приведены фотографии поверхности слоев индия, полученные с помощью РЭМ, показывающие изменение морфологии поверхности при добавлении примесей кислорода и аргона. Видно, что это приводит к образованию мелкозернистой структуры с большой шероховатостью.

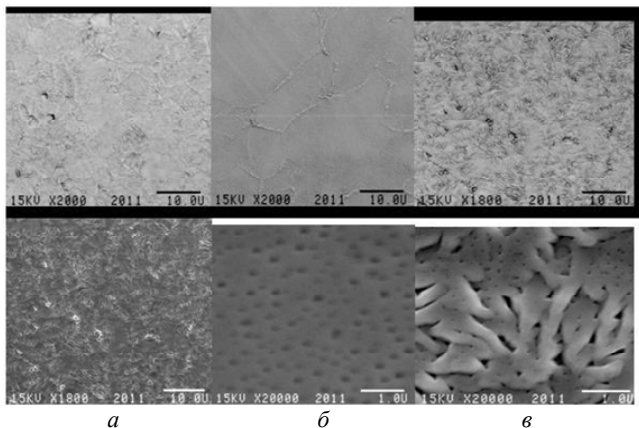


Рис. 2. Фотографии на РЭМ поверхности индиевых слоев, напыленных при условиях:
а — добавление в камеру аргона; б — высокий вакуум;
в — добавление кислорода

Аналогичные изменения структуры наблюдаются при изменении скорости осаждения: при увеличении скорости наблюдается увеличение размера зерна и уменьшение шероховатости поверхности, что подтверждается данными рис. 3, полученными по результатам химического травления поверхности образцов.



Рис. 3. Зависимость размера зерен от скорости напыления слоя индия

Микроструктура слоев

Приведенные изменения морфологии поверхности напыленных слоев сопровождаются соответствующими изменениями микроструктуры пленок.

Анализ РЭМ-фотографий поперечного сечения двух типов пленок, выращенных при высокой скорости напыления ("зеркальный" индий) и низкой скорости ("матовый" индий), показал, что для образцов второго типа наблюдается практически хаотическая ориентация зерен, в то время как у первого типа — выраженная преимущественная ориентация зерен, близкая к направлению, перпендикулярному к поверхности.

Наличие преимущественной ориентации у "зеркального" индия подтверждается результатами послойного травливания (рис. 4), из которых следует, что размер зерен (кристаллитов) слабо меняется по толщине образцов.

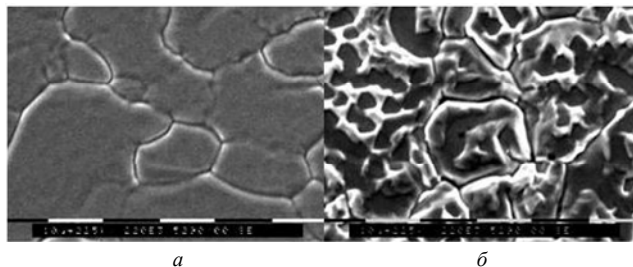


Рис. 4. Структура поверхности индия после травливания слоя в течение 30 с (а) и 3 мин (б)

Обсуждение результатов

Полученные результаты достаточно хорошо объясняются в рамках модели структурных зон (SZM) [1, 2], описывающей изменения микроструктуры различных металлических слоев в зави-

симости от отношения (T_s / T_m) во время процесса осаждения слоя (T_s — температура подложки, T_m — температура плавления материала слоя).

Действительно, увеличение размера зерна с ростом скорости напыления при методе термического испарения можно объяснить увеличением температуры подложки из-за действия нескольких факторов: увеличения скорости выделения теплоты кристаллизации и увеличения радиационного нагрева образцов с увеличением тока через испаритель. В соответствии с закономерностями SZM увеличение отношения (T_s / T_m) до значений больше 0,5 приводит к микроструктуре пленок с размером зерен (кристаллитов), близкой к толщине пленки, и к появлению преимущественной ориентации, зависящей от типа кристаллической решетки металла (зона Z3 в модели). Поскольку у индия тетрагональная решетка близкая к кубической гранцентрированной [3], то зерна должны ориентироваться близко к нормали к плотноупакованным плоскостям (111). Образование данной структуры объясняется значительной объемной и поверхностной диффузией металла во время роста пленки.

Для индия из-за низкой температуры плавления T_m это условие выполняется в широком диапазоне температур подложки. Так, в наших экспериментах при напылении с высокой скоростью выполняется неравенство $T_s > 293$ К и, соответственно, $(T_s / T_m) > 0,7$.

Для получения пленок с мелкозернистой структурой ("матовый" индий) помимо снижения скорости напыления необходимо снижать температуру подложки. В этом случае эффективно также повышение остаточного давления, когда остаточный кислород во время роста пленки захватывается границами зерен и препятствует их дальнейшему укрупнению, что также подтверждается полученными результатами.

Важно отметить, что оптимальная микроструктура слоев индия зависит от метода формирования

индиевых микроконтактов (химическое травление, ионное травление, "взрывная" технология) и требуемых физических свойств для проведения процессов гибридизации (твердость, пластичность).

Так, микроструктура пленки, получаемая при высоких скоростях напыления с ориентацией зерен и гладкой поверхностью предпочтительна при использовании метода ионного травления, поскольку обеспечивает высокие скорости травления [4]. С другой стороны, мелкозернистая структура оптимальна для химического травления, так как способствует однородному травлению промежуточных при формировании микроконтактов [5].

Выводы

Полученные результаты можно сгруппировать следующим образом.

1. Установлены основные параметры процесса формирования пленок индия методом термического испарения, влияющие на их микроструктуру (скорость напыления, остаточное давление и содержание примесей кислорода и аргона в вакуумной камере).

2. Увеличение размера зерна в пленках индия сопровождается усилением их преимущественной ориентации в направлении, нормальном к поверхности.

3. Полученные в работе результаты удовлетворительно объясняются в рамках модели структурных зон (SZM).

Литература

1. Petrov I., Barna P. B., Haltman L., Green J. E. // J. Vac. Sci. Technol. 2003. V. A21. P. 117.
2. Палатник Л. С., Фукс М. Я., Косевич В. М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. — М.: Наука, 1972.
3. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. — М.: Мир, 1974.
4. Болтарь К. О., Корнеева М. Д., Мезин Ю. С., Седнев М. В. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 96.
5. Батырев Н. И., Драчева Е. О., Климанов Е. А., Микертумянц А. Р., Серегина Н. Н. // Там же. 2008. № 2. С. 108.

Deposition parameter influence on indium film microstructure

N. V. Kardonov, E. A. Klimanov, A. V. Lialikov, Yu. S. Mezin,
M. V. Sednev, B. V. Troshin, Yu. P. Sharonov
Orion Research-and-Production Association,
9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Results of investigation of the preparation parameters at indium films structure formation are obtained. It is shown that microstructure is a function of deposition variables including impurities in vacuum chamber, deposition rate and substrate temperature. The results are describing in terms of the structure zone model (SZM).

PACS: 85.40.-e

Keywords: microstructure, films, vacuum chamber, indium, residual gases.

Bibliography — 5 references.

Received October 29, 2011