

УДК 621.793:546.96

**СТРУКТУРА, СОСТАВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ТОНКИХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РУТЕНИЯ,
ПОЛУЧЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ****В.Ю. Васильев**

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия
E-mail: vladislavvasilyev@gmail.com

Статья поступила 3 мая 2017 г.

Систематизированы экспериментальные данные о взаимосвязи удельного электросопротивления, плотности, структуры и состава тонких слоев рутения (ТСР), синтезированных в интервале температуры 160—310 °С при импульсном осаждении из газовой фазы с участием карбонил-диенового предшественника $\text{Ru}(\text{CO})_3(\text{C}_6\text{H}_8)$ и NH_3 и N_2O в качестве вторых реагентов. Основной примесью в ТСР после их осаждения и отжига является углерод с концентрацией ~30—50 ат.%. Для повышения плотности и снижения электросопротивления ТСР до значений менее 50 мкОм·см целесообразно при синтезе использовать N_2O , а также применять последующий термический отжиг ТСР при температурах до 700 °С, улучшающий кристаллическую структуру слоев.

DOI: 10.26902/JSC20170809

Ключевые слова: слои рутения, карбонил-диеновый предшественник, импульсное осаждение из газовой фазы, плотность, структура, состав и электрическое сопротивление слоев рутения.

ВВЕДЕНИЕ

Металлоорганические соединения (МОС) нашли широкое применение в современных прецизионных технологиях для формирования тонкослойных функциональных покрытий методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ). При ХОГФ из МОС одной из важнейших проблем является внедрение в материал осажденного слоя нежелательных примесей (прежде всего — примеси углерода), ухудшающих структуру и свойства слоев, в частности важнейший параметр тонких металлических слоев — их удельное электросопротивление [1]. Очевидно, что выбор оптимальных исходных реагентов-предшественников и условий синтеза тонких слоев при ХОГФ с их участием являются важнейшими задачами материаловедения тонкослойных покрытий.

Среди металлов платиновой группы, рассматриваемых кандидатами для современных микро- и нанотехнологических применений, в последние годы наибольшее внимание привлекли тонкие слои металлического рутения (ТСР), получаемые различными методами ХОГФ с использованием различных типов МОС: гетеролигандных карбониллов, циклопентадиенильных производных, β -дикетонатных производных, аллильных производных и др. [2]. Обобщения результатов исследований ТСР в [2, 3] показали, что независимо от типа предшественника и условий ХОГФ общими проблемами получения качественных ТСР являются: обратно зависящая от температуры осаждения длительность нуклеационной задержки, островковый характер роста

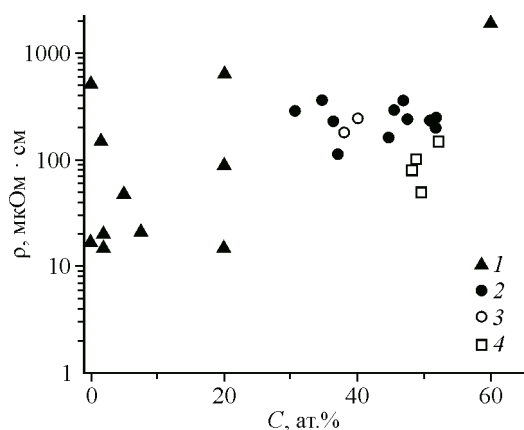


Рис. 1. Корреляция электросопротивления и концентрации примеси углерода в ТСР.

Обозначения: данные из обзора [2] для разных типов предшественников и условий ХОГФ (1); данные настоящей работы для ТСР, полученные при ХОГФ из предшественника $\text{Ru}(\text{chd})(\text{CO})_3$ при 198 °С (2—4), с участием NH_3 (2) и N_2O (3), а также после быстрого термического отжига при 400—700 °С (4)

ТСР с низкой скоростью роста, формирование поликристаллических ТСР, сильная неконформность роста ТСР на трехмерных рельефах современных приборов, неприемлемо высокое электросопротивление. Связывая последнее с возможным влиянием содержания в ТСР примесей, прежде всего — углерода, на

рис. 1 представлены результаты обработки немногочисленных фактических данных из обзора [2] для электросопротивления и содержания примеси углерода в ТСР, полученных из вышеприведенных типов предшественников рутения при различных условиях ХОГФ. Можно видеть (сплошные треугольники), что какой-либо однозначный вывод о наличии количественной корреляции этих параметров сделать невозможно.

Из проанализированных в [2, 3] ТСР к настоящему моменту времени по совокупности публикаций наиболее детально и всесторонне исследован процесс с использованием гетеролигандного карбонила рутения (η^4 -циклогекса-1,3-диен) $\text{Ru}(\text{CO})_3$ (tricarbonyl[η^4 -cyclohexa-1,3-diene]ruthenium, далее $\text{Ru}(\text{chd})(\text{CO})_3$, впервые представленного в работе [4]). Экспериментальные исследования с участием данного реагента-предшественника в условиях импульсного осаждения ТСР выполнялись, в частности, исследовательским коллективом с основным участием автора настоящей работы в течение двух лет в Корейском политехническом университете (Korea Polytechnic University, Department of Nano-Optics Engineering, Siheung-City, Gyeonggi-do, 429-793, Republic of Korea) в рамках научно-технического проекта, финансируемого правительством провинции Gyeonggi-Do.

Реагент-предшественник $\text{Ru}(\text{chd})(\text{CO})_3$, представляющий собой жидкость при нормальных условиях, что является очень удобным с точки зрения технологии, рассматривался перспективным вариантом для снижения температуры синтеза ТСР в сравнении с другими известными предшественниками. При этом в качестве второго реагента изначально рассматривался газообразный аммиак, исключая образование нежелательных оксидных фаз в ходе ХОГФ, даже за счет возможности некоторого возрастания концентрации углерода в ТСР. Оборудование и метод осаждения освещены в [5—7], результаты оригинальных экспериментальных исследований приведены в [8—14], в том числе с использованием "мягкого" окислителя N_2O . Позднее результаты оригинальных исследований были систематизированы и обобщены в серии публикаций [15—21], посвященных следующим вопросам: аппаратуре и методологии синтеза ТСР при ХОГФ, кинетики нуклеации и роста слоев, характеристики морфологии, состава и свойств ТСР и т.д. Конечной задачей исследования был поиск возможности и условий для роста ТСР в режиме атомно-слоевого наращивания (Atomic Layer Deposition [22] далее ADL), что позволило бы рассматривать такие слои для формирования проводников в элементах памяти будущих интегральных микросхем. В настоящей работе оригинальные экспериментальные данные с привлечением ранее фрагментарно опубликованных данных о структуре и свойствах ТСР систематизированы и проанализированы с целью установления количественных взаимосвязей структуры и состава слоев и их электросопротивления.

КРАТКОЕ ОБОБЩЕНИЕ СОВОКУПНОСТИ РАНЕЕ ОПУБЛИКОВАННЫХ ДАННЫХ

Условия получения ТСР из $\text{Ru}(\text{chd})(\text{CO})_3$ обобщены в табл. 1; детали сведения об аппаратуре и методе осаждения приведены в [15, 21]. Нуклеационные эффекты и кинетика роста ТСР в зависимости от температуры осаждения $T_{\text{д}}$, давления, качества и расхода предшествен-

Т а б л и ц а 1

Параметры импульсных процессов осаждения ТСР

Параметр процесса	Величина
Температура пластины, °С	160—310
Давление, мм рт. ст.	0,8—5,0
Вариант организации цикла осаждения (длительность цикла): Вариант 1 (4 с): Ru(chd)(CO) ₃ /Ag/NH ₃ /Ag Вариант 2 (20 с): Ru(chd)(CO) ₃ /отк/Ag/отк/NH ₃ /отк/Ag/отк.	по 1 с каждый компонент от 1 до 10 с, типично
Примечание: "отк" — форвакуумная откачка	по 3 с каждый компонент
Расход Ru(chd)(CO) ₃ , мг/импульс	0,7—1,9
Концентрация Ru(chd)(CO) ₃ в реакторе, моль/л ($\times 10^{-7}$)	5,3—14,0
Вторые реагенты	NH ₃ , N ₂ O
Кол-во импульсов при осаждении	1—300
Материал поверхности образца	Si(100), SiO ₂ и др. [17, 21]
Интервал толщин ТСР, нм	16—140, типично 40—60

ника, варианта организации цикла осаждения, вида второго реагента, материала поверхности образца и т.д. были проанализированы в работах [8—14, 16, 17, 21]. В изученных диапазонах условий температурная зависимость скорости роста ТСР (W) для NH₃ и N₂O для типичной длительности их импульсов 1—3 с была описана обобщенной кривой, приведенной на рис. 2, а. Пунктиром на рисунке показана температура осаждения 200 °С, разделяющая закономерности роста ТСР. При температурах <200 °С (предположительно наиболее соответствующих искомому режиму ALD) имела место явно выраженная нуклеационная задержка (показана в виде плоского участка кривой), где на редких зародышах формировались крупные островки с постепенным ростом крупно-островковых ТСР с низкой (около 0,1 нм/цикл) скоростью наращивания. При этом при увеличении длительности импульса NH₃ до 10 с нуклеация улучшалась, скорость осаждения возрастала (эта условная область очерчена пунктиром на рис. 2, а). При температурах >200 °С нуклеационные задержки отсутствовали, формировались многочисленные зародыши, а ТСР вырастали согласно кинетике первого порядка по предшественнику [16, 21]. При >200 °С ТСР росли и без участия вторых реагентов в режиме термораспада Ru(chd)(CO)₃, что показано стрелкой на рис. 2, а, однако при температурах <200 °С скорости наращивания были неприемлемо низкими. Обобщение кинетики роста и предложенная схема процесса роста ТСР приведены в [19, 21].

Шероховатость ТСР (rms) составляла не более 2,0 нм при >200 °С и не более 4 нм при <200 °С; все синтезированные ТСР состояли из нанокристаллитов с размером, оцененным с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) на уровне около 5 нм [20]. При этом изображения морфологии поверхности в РЭМ для ТСР полученных с применением N₂O выгля-

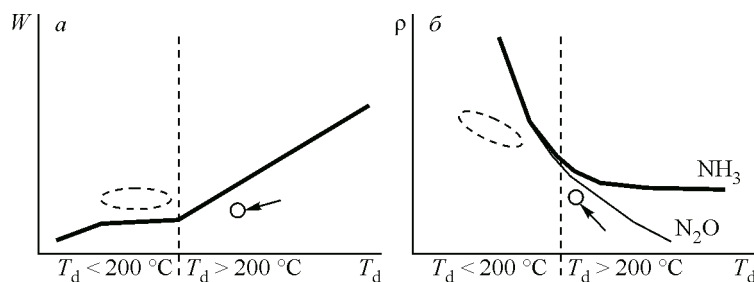


Рис. 2. Обобщенные температурные зависимости: роста ТСР (а) и электросопротивления ТСР (б) (см. пояснения в тексте)

дели существенно резче в сравнении с более размытыми изображениями поверхности ТСП, полученными с применением NH_3 (оригинальные РЭМ изображения ТСП, полученными при различных условиях, могут быть найдены в [2, 9—13, 16, 17, 21]).

Температурная зависимость электросопротивления ТСП показана в обобщенном виде на рис. 2, б. Удельное электросопротивление резко возрастало при малых толщинах ТСП и низких температурах, что было объяснено несплошностью крупно-островковых слоев. Для сплошных образцов, полученных с N_2O , электросопротивление было существенно ниже в сравнении с образцами, полученными с NH_3 (см. рис. 2, б). Улучшение зародышеобразования при увеличении длительности импульса NH_3 до 10 с приводило к снижению электросопротивления ТСП (см. область, очерченную пунктиром, на рис. 2, б). Образец ТСП, полученный без участия второго реагента, обнаружил несколько меньшее электросопротивление (показано стрелкой на рис. 2, б). Однако даже для наилучших образцов ТСП после осаждения (толстые, высокотемпературные, мелкокристаллические) электросопротивление было существенно выше, чем таковое справочное для металлического рутения (~ 7 мкОм·см).

Ранее были также опубликованы некоторые данные о структуре [8, 18, 21], составе [5, 20, 21], свойствах [10, 18, 21] ТСП, однако систематизированных данных о корреляции электросопротивления с составом и структурой ТСП ранее не было опубликовано.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Морфология поверхности и состав ТСП различной толщины исследовались на аппаратуре центра коллективного пользования Korea Polytechnic University. Использовались РЭМ FEI Hitachi S-4700 и FEI Nova NanoSEM 200, оснащенные приставками энергодисперсионного рентгеновского микроанализа EDX. Толщину слоев d измеряли методами РЭМ по толщине ТСП на сколе структуры (толстые слои) и спектральной эллипсометрии (тонкие слои), см. методические подробности измерения толщины в [11, 12].

Для измерения поверхностного сопротивления слоев рутения (R_s) использовали прибор CMT-SR2000N (Advanced Instrument Technology, Inc., США), основанный на четырехзондовом методе измерения. Данный прибор позволял определять большое количество точек на пластине в автоматическом режиме, а также работать с небольшими по размеру образцами в ручном режиме. После проведения измерений исходного R_s на образцах после осаждения они для дальнейших исследований раскалывались на небольшие кусочки и подвергались термическому отжигу в различных условиях (см. подробности в [18, 21]). После отжига поверхностное сопротивление ТСП, а также их толщину измеряли повторно, что позволяло оценить величину усадки ТСП. Расчеты электросопротивления проводили путем умножения усредненных величин R_s (минимум три точки на образце) на усредненные толщины этих ТСП, определенные методами РЭМ или спектральной эллипсометрии ($\rho = R_s \cdot d$).

Для аналитических исследований образцы ТСП в рамках договорных отношений передавались в специализированные исследовательские центры при научно-образовательных и научных учреждениях Республики Корея (Korea University, Seoul National University, Hanyang University, Korean Research Institute of Science and Standards), где анализировались на стандартизированном оборудовании в соответствии со стандартизированными методиками подготовки и обследования образцов. Исследования были проведены с помощью: рентгеновской дифрактометрии (метод GIXRD) на приборе D8 Discover фирмы Bruker с использованием стандартных справочных данных для Ru и RuO_2 , рентгеновской рефрактометрии для исследования плотности слоев (метод XRR) на приборе X'Pert PRO MPD фирмы PANalytical (с последующим расчетом величин плотности ТСП и выдачей окончательных результатов). Регистрация послойного элементного состава ТСП проводилась методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования структуры ТСП. В первой колонке табл. 2 приведены диапазоны параметров процессов ХОГФ, использованные для получения ТСП для структурных исследований.

Переменные и результаты исследования структуры ТСР

Параметр	Особенности в дифрактограммах
Цикл по варианту 1 или 2	Четкие группы <i>A</i> и <i>B</i> независимо от варианта 1, 2
Температура осаждения (180—260 °С)	Четкие группы <i>A</i> и <i>B</i> , возрастание группы <i>B</i> с ростом температуры
Давление (0,8—2,5 мм рт. ст.)	Четкие группы <i>A</i> и <i>B</i>
Второй реагент (NH ₃ или N ₂ O)	N ₂ O — только группа <i>A</i> , NH ₃ — группы <i>A</i> , <i>B</i> .
Длительность импульса NH ₃ (0—10 с)	При увеличении длительности импульса NH ₃ до 10 с возрастает группа <i>A</i> , исчезает группа <i>B</i>
Температура термического отжига (400, 500, 600, 700 °С).	При возрастании температуры отжига в группах <i>A</i> , <i>B</i> , <i>B</i> четко выделяются пики текстур

На рис. 3, *a*, *б* приведены примеры дифрактограмм, а их краткая характеристика и особенности для ТСР после ХОГФ и отжига приведены во второй колонке табл. 2. При изученных условиях все образцы ТСР были поликристаллическими, однако в образцах после осаждения четкие пики текстур рутения не идентифицировались. В связи с этим для удобства описания дифрактограмм были выделены три группы областей *A*, *B*, *B*. Группа *A*, соответствующая широкой области $2\Theta = 38\text{—}45^\circ$, включает текстуры рутения $\langle 100 \rangle$, $\langle 002 \rangle$ и $\langle 101 \rangle$ при $2\Theta = 38,383$, $42,152$ и $44,005^\circ$ соответственно, согласно данным JCPD. Группа *B*, соответствующая области $2\Theta = 53\text{—}58^\circ$, с максимумом в области $2\Theta \sim 55^\circ$, на основании полученных данных пока необъяснима. Она, по-видимому, частично включает текстуру рутения $\langle 102 \rangle$ ($2\Theta = 58,323^\circ$). Если допустить возможное присутствие оксидной фазы в ТСР, то тогда в этой области могла бы находиться текстура RuO₂ (211) с $2\Theta = 54,245^\circ$. Однако против этого предположения свидетельствует отсутствие в дифрактограммах, имеющих наибольшую интенсивность текстур RuO₂ $\langle 110 \rangle$ и $\langle 101 \rangle$ при $2\Theta = 28,009$ и $35,050^\circ$ соответственно по данным JCPD. Что касается группы *B* при $2\Theta = 68\text{—}72^\circ$ с очень слабой интенсивностью, то наиболее близкой текстурой рутения здесь является $\langle 110 \rangle$ ($69,405^\circ$).

Быстрый термический отжиг приводил к улучшению кристаллической структуры ТСР [8]. Данные рис. 3, *б* показывают, что при повышении температуры термообработки ТСР пики становятся более четко выраженными: отчетливо проявляются текстуры $\langle 100 \rangle$, $\langle 002 \rangle$, $\langle 101 \rangle$, $\langle 102 \rangle$,

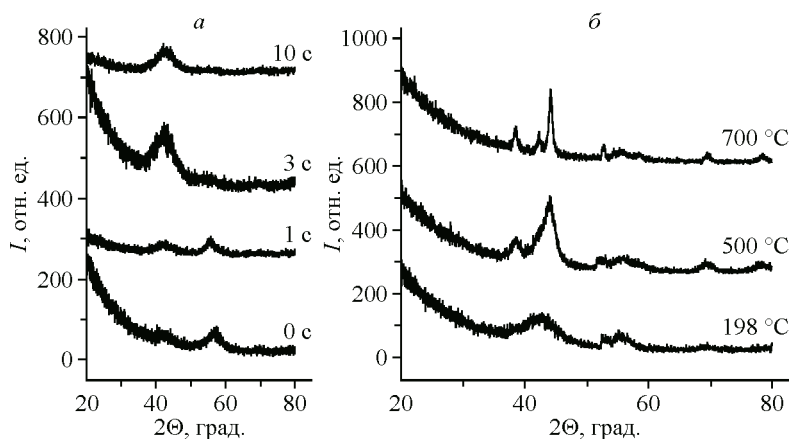


Рис. 3. Дифрактограммы ТСР, полученные при температуре осаждения 198 °С по варианту цикла 2: при разной длительности импульса аммиака (*a*) и при различных температурах отжига ТСР, полученных при температуре 198 °С и варианту цикла 1 и длительности импульса аммиака 1 с (*б*)

$\langle 110 \rangle$, а также появляется текстура $\langle 103 \rangle$ (78,388). При этом пики при $2\Theta = 53\text{—}57^\circ$ практически явно не выражены.

Исследования состава ТСР. В работах [5, 20, 21] были приведены результаты исследований состава ТСР методами Оже-спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной микроскопии. Концентрация кислорода была найдена не превышающей 1 ат.%, а анализ содержания углерода оказался невозможен ввиду наложения пиков $Ru3d$ для рутения ($\sim 280,26$ и $284,44$ эВ) и углерода $C1s$ ($\sim 284,5$ эВ).

Анализ EDX выполняли для образцов ТСР, полученных с использованием аммиака при различных температурах осаждения, различных вариантах организации цикла импульсного ХОГФ, для образцов ТСР после отжига. Все исследованные образцы обнаружили концентрацию углерода в диапазоне 30—52 ат.% (в целом укладываюсь в слабосходящий тренд зависимости электросопротивления от концентрации углерода, см. рис. 1), а также азота не более 4—8 ат.% и кислорода не более 6 ат.% без каких-либо четких зависимостей от условий ХОГФ. При термическом отжиге какого-либо закономерного изменения концентраций этих элементов обнаружено не было, хотя электросопротивление ТСР уменьшалось в разы.

Исследования ТСР методом ВИМС проводили для образцов, полученных с участием различных вторых реагентов или при различных длительностях импульса аммиака. Качественные кривые на рис. 4, *a—z* показывают, что при применении N_2O имело место существенно меньшее содержание в ТСР углерода, азота и водорода при несколько повышенном содержании кислорода. На этих же рисунках приведены в качестве справочных результаты ВИМС анализа образца ТСР, полученного путем термораспада (без участия второго реагента). Хотя толщина образца ТСР была примерно вдвое меньше, чем остальных образцов, можно заметить, что режим термораспада обнаружил меньшую концентрацию углерода и азота, совпадая с образцом, полученным при использовании N_2O . Также данные ВИМС подтвердили, что при быстром термическом отжиге не происходило системных изменений содержания примесей углерода, азота, кислорода и водорода в ТСР [20, 21].

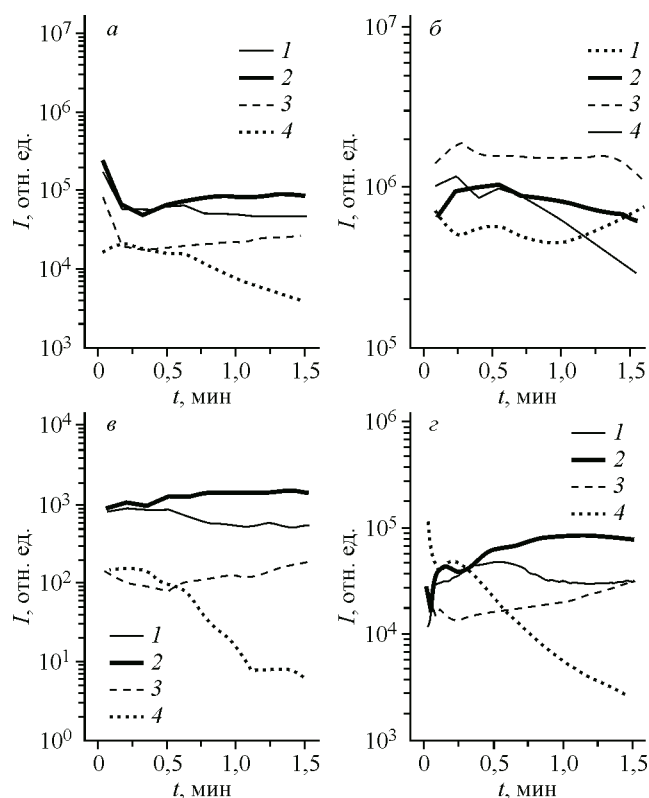
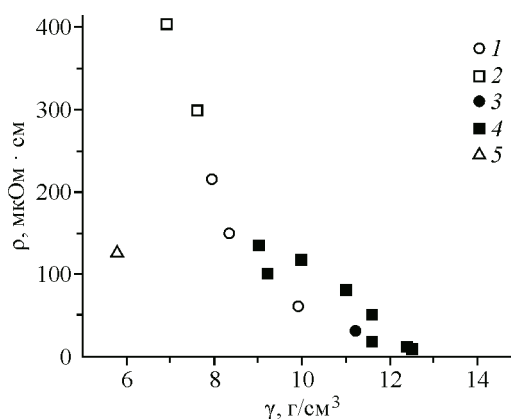


Рис. 4. Сравнительные данные ВИМС о наличии примесей в ТСР, полученных при температуре подложки 181°C по варианту 2 с участием различных вторых реагентов: С (*a*), О (*б*), N (*в*), Н (*z*). Обозначения: длительность импульса NH_3 3 с (1); длительность импульса NH_3 10 с (2); длительность импульса N_2O 3 с (3); термораспад предшественника (4). Время распыления t приведено для толщины ТСР без травления материала подложки

Рис. 5. Корреляция электросопротивления и плотности ТСП по методу XRR.

Обозначения: при использовании N_2O , после осаждения (1); при использовании NH_3 , после осаждения (2); при использовании N_2O , после отжига (3); при использовании NH_3 , после отжига (4); без второго реагента, после осаждения (5)



Исследования плотности ТСП. Исследованные ТСП обнаруживали низкие значения плотности: некоторые образцы были визуально рыхлыми и отслаивались от поверхности подложки. Экспериментальный анализ некоторых характерных образцов ТСП методом XRR позволил определить диапазон плотности после осаждения примерно $5\text{--}10\text{ г/см}^3$, а после термического отжига при 1000 °C — до $\sim 12,4\text{ г/см}^3$ (справочная величина для металлического рутения составляет $12,41\text{ г/см}^3$). Поскольку измерения плотности методом XRR являются затратными, в работе [18] была проведена оценка возможности применения косвенного метода оценки плотности по величине усадки после отжига, показавшая близкую к линейной зависимость данных величин. Установлено, что сильное возрастание усадки ТСП имеет место при низких температурах осаждения $<200\text{ °C}$.

Корреляция проводимости ТСП с их составом и свойствами. Данные о корреляции плотности ТСП и электросопротивления этих образцов (рис. 5) показывают предпочтительное использование N_2O . После быстрого (30—60 с) отжига в инертной среде при $400\text{--}700\text{ °C}$, который обычно применяется в ходе технологических операций изготовления микроэлектронных приборов, электросопротивление ТСП составляло $50\text{--}100$ и $20\text{--}50\text{ мкОм}\cdot\text{см}$ для NH_3 и N_2O соответственно [8, 14, 21]. Представляется интересным приведенный на рис. 5 справочный результат для образца ТСП, полученного при термораспаде предшественника, показавший низкое сопротивление при наименьшей плотности, что коррелирует с меньшим содержанием углерода и азота в таком образце (см. рис. 4, а, в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированные при температурах $<200\text{ °C}$ ТСП обнаружили значительное количество нежелательных примесей углерода, азота, кислорода и водорода, низкую плотность и неприемлемо высокое удельное электрическое сопротивление. С точки зрения минимизации содержания нежелательных примесей, повышения плотности и снижения электросопротивления предпочтительно использование в качестве второго реагента окислителя N_2O . Термический отжиг позволяет существенно повысить плотность ТСП и снизить их удельное электросопротивление, однако при этом существенного изменения содержания примесей в ТСП не обнаруживалось. Режим ALD для данной химической системы при исследованных условиях не обнаружен, а ключевой причиной этого предположена нуклеационная задержка. Принципиальное улучшение нуклеации с повышением скорости осаждения, улучшение конформности осаждения на трехмерных рельефах и снижение электросопротивления ТСП, синтезированных при пониженных температурах, могут быть достигнуты применением затравочных слоев металлов (PtPd, Pt, Ru) субнанометровой толщины, что указывало на возможность формирования слоев по типу ALD при температурах менее 200 °C . Однако при всех изученных условиях ТСП растут поликристаллическими с размерами нанокристаллитов около 5 нм . Для оценки применимости таких слоев в современных технологиях необходимо провести детальное исследование особенностей формирования их структуры, состава и электросопротивления.

Автор выражает благодарность коллегам S.H. Chung и Y.W. Song за помощь и плодотворные обсуждения результатов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разуваев Г.А., Грибов Б.Г., Домрачев Г.А., Саламатин Б.А. Металлоорганические соединения в электронике. – М.: Наука, 1972.
2. Васильев В.Ю., Морозова Н.Б., Игуменов И.К. // Успехи химии. – 2014. – **89**, № 3. – С. 758.
3. Hamalainen J., Ritala M., Leskela M. // Chem. Mater. – 2014. – **26**. – P. 786.
4. Ingham S.L., Magennis S.W. // J. Organomet. Chem. – 1999. – **574**. – P. 302.
5. Lee J., Song Y. W., Lee K., Lee Y., Jang H.K. // ECS Transactions. – 2006. – **2**, N 4. – P. 1.
6. Lee K.D., Lee Y.M., Chung S., Song Y.W., Jang H.K. // Proc. 4th Int. Symp. NANO KOREA 2006. – Seoul, Korea., 2006. – CDROM paper N PMA038.
7. Chung S., Lee Y.M., Lee K.D., Song Y.W., Jang H.K. // Proc. 2006 DPS Symposium. – Nagoya, Japan, 2006. – P. 259.
8. Chung S.-H., Vasilyev V.Yu., Gorokhov E., Song Y.W., Jang H.-K. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. – 2007. – **990**. – Paper N 0990-B08-01.
9. Vasilyev V.Yu., Chung S.H., Song Y.W. // Proc. 5th Int. Symp. NANO KOREA 2007. Seoul, Korea, 2007. – CDROM paper N PMA047.
10. Chung S.H., Vasilyev V.Yu., Jung S.T., Park D.B., Jang H.K., Song Y.W. // Proc. 5th Int. Symp. NANO KOREA 2007. – Seoul, Korea, 2007. – CDROM paper N PMA049.
11. Vasilyev V.Yu., Chung S.H., Song Y.W. // Electrochem. Soc. Proc. Volume PV 2008-01. – P. 667 – 673.
12. Vasilyev V., Mogilnikov K., Song Y.W. // J. Electrochem. Soc. – 2008. – **155**. – P. D763.
13. Vasilyev V., Mogilnikov K., Song Y.W. // Electrochem. Solid State Lett. – 2008. – **11**. – P. D89.
14. Vasilyev V., Mogilnikov K., Song Y.W. // Cur. Appl. Phys. – 2009. – **9**. – P. e148.
15. Васильев В.Ю. // Микроэлектроника. – 2010. – **39**, № 1. – С. 28.
16. Васильев В.Ю. // Микроэлектроника. – 2010. – **39**, № 3. – С. 219.
17. Васильев В.Ю. // Микроэлектроника. – 2010. – **39**, № 4. – С. 284.
18. Васильев В.Ю. // Микроэлектроника. – 2011. – **40**, № 4. – С. 300.
19. Васильев В.Ю. // Микроэлектроника. – 2011. – **40**, № 6. – С. 441.
20. Васильев В.Ю. // Микроэлектроника. – 2013. – **42**, № 1. – С. 62.
21. Vasilyev V.Yu. In: Ruthenium: Properties, Production and Applications / Ed. D.B. Watson. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. – P. 1 – 84.
22. Ritala M., Leskela M. Handbook of Thin Film Materials. Vol. 1 / Ed. H.S. Nalwa. – San Diego: Academic Press, 2002. – P. 103 – 159.