

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ И ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР

Представлены результаты исследования влияния отжига в воздушной среде на свойства пленок и параметры структур на их основе. Показано, что отжиг приводит к рекристаллизации структуры резистивных пленок, вызывающей изменение свойств, морфологии поверхности пленок и стабилизацию выходных параметров резистивных структур. Разработана физико-математическая модель управления выходными параметрами резистивных структур за счет выбора режимов конденсации и отжига.

Введение

Для изготовления чувствительных элементов преобразователей информации широко применяются многокомпонентные металлопленочные резистивные структуры на основе хромоникелевых сплавов, которые получают методом термического испарения в вакууме, обеспечивающим как заданные свойства пленок, так и морфологию поверхности, определяющую поверхностные явления, а следовательно, и выходные параметры резистивных структур. Управление свойствами пленок хромоникелевых сплавов достигается за счет их термической обработки в воздушной среде [1–3], вызывающей отжиг дефектов и рекристаллизацию структуры пленки.

1 Методика эксперимента

Резистивные структуры на основе хромоникелевых сплавов различного состава синтезируют методом термического испарения в вакууме на подложках из слюды и ситалла. В качестве исходной загрузки применяют сплав типа Х20Н75Ю. Контактные площадки к резистивным структурам формируют из Al и Cu. Форму, размеры резистивных структур и контактных площадок задают с помощью биметаллических масок.

Отжиг структур производят в воздушной среде в диапазоне температур от 350 до 700 К.

Для исследования морфологии поверхности применяют атомно-силовой микроскоп с максимальной областью сканирования (80×80) мкм². Зондами служат стандартные кантилеверы фирмы «NT-MDT» из кремния пирамидальной формы с радиусом закругления 20 нм и жесткостью 1,7 Н/м. Атомно-силовой микроскоп позволяет получать трехмерные изображения топологии поверхности пленок с латеральным разрешением, сравнимым с растровой электронной микроскопией, и визуализировать отдельные фрагменты поверхности пленки. Сканирование поверхности проводят при комнатных условиях в контактном режиме при постоянной высоте и силе (уровень сил 150–300 нН) взаимодействия зонд–подложка.

Сопrotивление резистивных структур исследуют в процессе их хранения на специализированном стенде, обеспечивающем многоканальные автоматизированные измерения.

2 Экспериментальные результаты и их обсуждение

Дефекты кристаллической решетки обуславливают квазиравновесное состояние пленки, поэтому термообработка вызывает протекание двух процессов: отжиг дефектов, рекристаллизацию структуры материала и окисление компонентов пленки. Это подтверждается тем, что сразу после отжига, проводимого в воздушной среде при температурах от 350 до 700 К, сопротивление структур возрастает, а затем в процессе эксплуатации изменяется значительно слабее по сравнению с резистивными структурами, которые не подвергались термообработке [1].

Состояние поверхности пленок играет важную роль при создании электрических контактов, определяя их переходное сопротивление и выходные параметры резистивных структур. Поверхности отожженных и неотожженных пленок на основе хромоникелевых сплавов представлены на рис. 1. Видно, что поверхности неоднородные и характеризуются фигурами роста. Отжиг вызывает рекристаллизацию структуры пленки, проявляющуюся в увеличении размеров фигур роста (см. рис. 1,б).

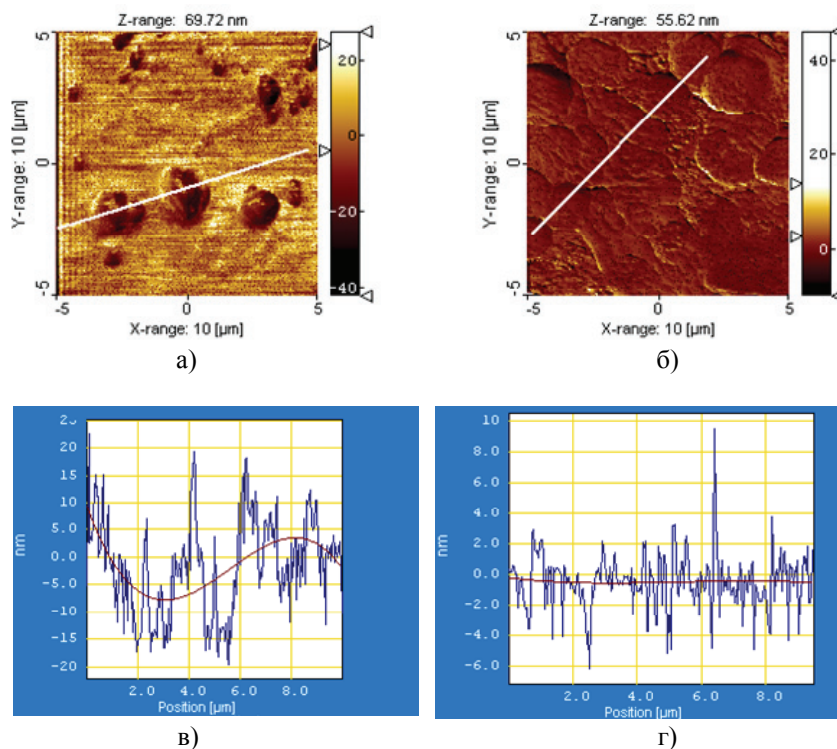


Рис. 1 Поверхности пленок на основе хромоникелевых сплавов, полученные на атомно-силовом микроскопе (область сканирования $10 \times 10 \text{ мкм}^2$):
а, б – поверхность пленки до и после отжига;
в, г – топография профиля поверхности до и после отжига

Топография поверхностей резистивных пленок на основе хромоникелевых сплавов представлена на рис. 1,в,г. Из них следует, что до отжига глубина и высота фигур роста по линии профиля изменяется от 10 до 40 нм, а после отжига в воздушной среде от 2 до 7 нм.

Таким образом, отжиг в воздушной среде резистивных пленок на основе хромоникелевых сплавов приводит к рекристаллизации структуры, в результате чего пленки становятся более однородными по толщине, что подтверждается уменьшением глубины и высоты неровностей почти в 5 раз.

Разработана физико-математическая модель изменения сопротивления резистивных структур от времени хранения за счет диффузии кислорода в два этапа [1]. Вначале атомы кислорода адсорбируются на поверхности резистивной пленки, а затем диффундируют в ее объем [1, 4, 5]. Они заполняют вакансии в узлах кристаллической решетки и образуют энергетические уровни, которые играют роль ловушек захвата электронов.

Зависимости изменения сопротивления резистивных структур от времени хранения для пленок из хромоникелевых сплавов, синтезированных на подложках из слюды и ситалла соответственно, представлены на рис. 2. Наблюдается рост сопротивления резистивных структур с увеличением времени хранения из-за деградации свойств пленок, вызванной диффузией кислорода. Сопротивление резистивных структур одинаково увеличивается для пленок, синтезированных на подложках из слюды и ситалла, и имеющих контактные площадки из различных материалов. Для описания процесса окисления пленок выбрана модель диффузии для полубесконечного твердого тела (т.к. процесс диффузии происходит из источника с постоянной концентрацией, который находится над поверхностью пленки), в рамках которой концентрация кислорода, диффундирующего в пленку за время t , равна

$$N = \frac{N_A}{\sqrt{b/p}} \times \operatorname{erfc} \left[\frac{d}{2} \sqrt{\exp \left[\exp \left(30,6 - 99061 \frac{1}{T_{\text{исп}}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{\exp \left(25,9 - 25886 \frac{1}{T_{\text{исп}}} \right)}{r T_{\text{п}}} \right) t \right]} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где N_A – постоянная Авогадро; b – постоянная Ван-дер-Ваальса; p – атмосферное давление; d – толщина пленки, $d = v_k(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}}) t_{\text{нап}}$; $v_k(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}})$ – скорость конденсации пленки; $t_{\text{нап}}$ – время напыления; $T_{\text{исп}}$ – температура испарения исходной загрузки; $T_{\text{п}}$ – температура подложки; r – молярная газовая постоянная.

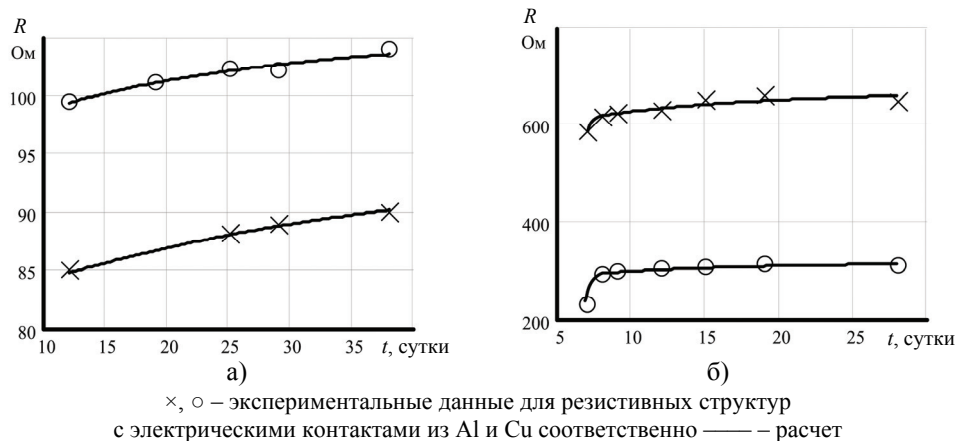


Рис. 2 Изменение сопротивления резистивных структур в процессе эксплуатации: а – материал подложки – слюда; б – материал подложки – ситалл

Диффузия кислорода в пленке осуществляется по вакансиям, концентрация которых определяется условиями конденсации.

С учетом уравнения (1) экспериментальные зависимости сопротивления резистивных структур, подвергшихся отжигу в воздушной среде, в процессе эксплуатации хорошо описываются системой уравнений (2) и (3) – до и после отжига соответственно:

$$R = \frac{l}{qad(n_0 - N)\mu_0(\tau t)^\gamma} \exp\left(\frac{qVk}{kT}\right); \quad (2)$$

$$R_{\text{отж}} = \left[R + \exp(-18,6 + 0,04T_{\text{отж}}) \right] + A_{\Delta R} x_{\text{Cr}}^7 T_{\text{отж}} \exp\left(\frac{-A_\tau \cdot x_{\text{Cr}}^{-1,3} T_{\text{отж}}}{t}\right), \quad (3)$$

где l – длина резистора; a – ширина резистора; q – элементарный заряд; n_0 – концентрация носителей заряда в объеме пленки сразу после напыления; μ_0 – подвижность носителей заряда в объеме пленки сразу после напыления; τ – эмпирический коэффициент, характеризующий время релаксации; γ – фактор рассеяния носителей заряда; Vk – контактная разность потенциалов, определяется материалом контакта и состоянием поверхности; k – постоянная Больцмана; T – температура; x_{Cr} – атомный состав хрома в пленках; $R_{\text{отж}}$ – сопротивление пленочного резистора после отжига; $A_{\Delta R}$, A_τ – эмпирические коэффициенты, зависящие от условий конденсации и материала контактных площадок, значения которых приведены в [1]; $T_{\text{отж}}$ – температура отжига.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости сопротивления пленочных резисторов, отожженных при температурах 350 и 400 К, от времени эксплуатации и теоретические кривые, рассчитанные по уравнениям (2) и (3). Из анализа графиков следует, что разработанная модель с высокой точностью описывает экспериментальные зависимости сопротивления пленочных резисторов от времени эксплуатации, причем она применима для пленочных резисторов, характеризующихся различными условиями конденсации, материалами электрических контактов, толщиной и режимом отжига.

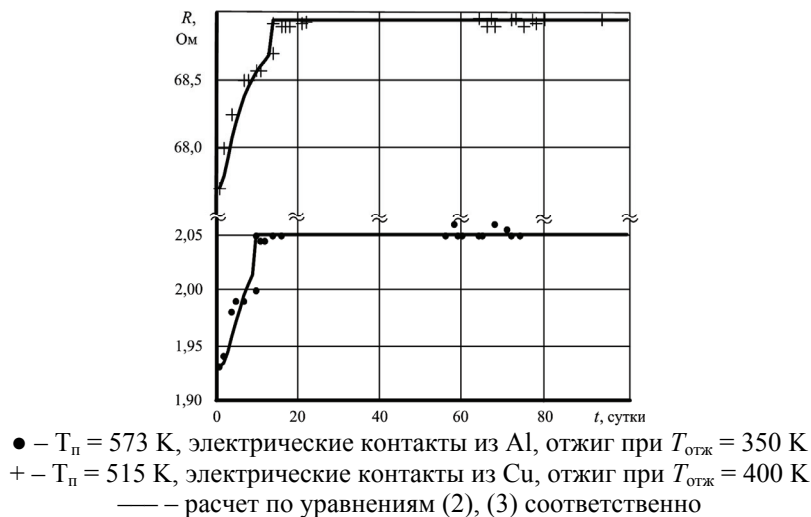


Рис. 3 Зависимости сопротивления пленочных резисторов, подвергшихся отжигу, от времени эксплуатации

Анализ рис. 2 и 3 показывает влияние материалов электрических контактов (для разных образцов) на величину контактной разности потенциалов резистивных структур на основе хромоникелевых соединений, которая в рамках разработанной модели находилась из максимального значения коэффициента корреляции в диапазоне от 0,80 до 0,95 между экспериментальными и рассчитанными значениями по уравнениям (2) и (3). Для неотожженных структур контактная разность потенциалов составляет $5 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ В. Переходное сопротивление электрических контактов неотожженных резистивных структур, оцененное косвенным путем по величине V_k , составляет 0,01–0,2 Ом, а после отжига оно мало настолько, что не регистрируется измерительным прибором.

В результате отжига улучшается кристаллическая структура пленок и стабилизируются выходные параметры резистивных структур, что подтверждается результатами экспериментальных исследований изменения их сопротивления от времени эксплуатации (рис. 3). Временная стабильность сопротивления пленочных резисторов оценивалась по величине коэффициента старения сопротивления, который зависит от времени эксплуатации и температуры отжига в воздушной среде (рис. 4).

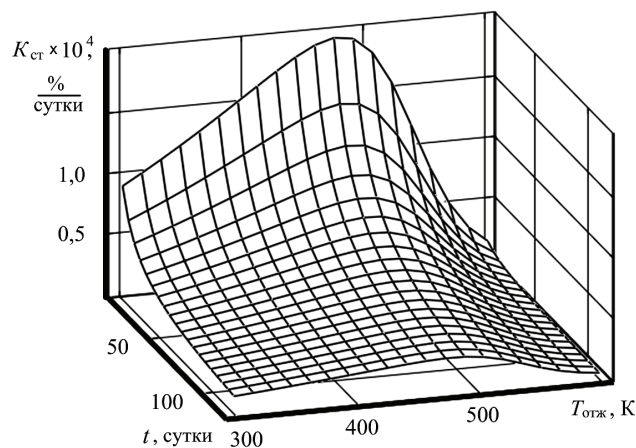


Рис. 4 Влияние температуры отжига на временную зависимость коэффициента старения сопротивления резистивной структуры с электрическими контактами из Cu

После отжига значения коэффициента старения сопротивления уменьшаются в $10^3 \dots 1,5 \cdot 10^4$ раз, причем наилучшие результаты достигаются при использовании температур, близких к 600 К. Длительная эксплуатация пленочных резисторов после отжига сопровождается стабилизацией сопротивления, что проявляется в уменьшении коэффициента старения сопротивления в 5–15 раз за 100–200 суток.

Следовательно, термическая обработка резистивных структур в воздушной среде приводит к отжигу дефектов кристаллической решетки, улучшению структуры пленок хромоникелевых сплавов и стабилизации выходных параметров резистивных структур.

Заключение

Таким образом, экспериментально и теоретически показана возможность управления морфологией поверхности пленок на подложках из слюды и ситалла и выходными параметрами резистивных структур с различными электрическими контактами посредством отжига в воздушной среде.

Список литературы

1. **Аверин, И. А.** Управляемый синтез гетерогенных систем: получение и свойства : монография / И. А. Аверин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 316 с.
2. **Аверин, И. А.** Исследование морфологии поверхности резистивных пленок многокомпонентных систем / И. А. Аверин, Ю. В. Аношкин, Р. М. Печерская // Физика и технология микро- и наносистем : сборник тезисов докладов 10-й научной молодежной школы по твердотельной электронике (26–27 мая 2007 г.). – СПб. : Изд-во ПИЯФ, 2007. – С. 16.
3. **Аверин, И. А.** Влияние условия конденсации на качество поверхности пленок твердых растворов на основе хрома и никеля / И. А. Аверин, Ю. В. Аношкин, Р. М. Печерская // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Международной научно-технической конференции (23–27 октября 2007 г.). – М. : МИРЭА, 2007. – Ч. 1. – С. 179–182.
4. **Майссел, Л.** Технология тонких пленок / Л. Майссел, Р. Глэнг. – М. : Сов. радио, 1977. – Т. 2. – 768 с.
5. **Аверин, И. А.** Математическое моделирование процессов старения резистивных пленок хромоникелевых сплавов / И. А. Аверин, Ю. В. Аношкин // Молодые ученые – науке, технологиям и профессиональному образованию в электронике : материалы Международной научно-технической школы-конференции (5–9 декабря 2006 г.). – М. : МИРЭА, 2006. – Ч. 2. – С. 80–83.