

## ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ И УВЕЛИЧЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

С.И. Проценко, В.В. Токмань, А.Н. Черноус

Представлены экспериментальные результаты исследования температурной зависимости термического коэффициента сопротивления (ТКС) пленочных систем на основе Ti, Ni и Cr, Ge. Отрицательное значение ТКС в первом случае связано с поглощением слоев Ti из остаточной атмосферы примесных газов, а во втором, скорее всего, с рекристаллизационными процессами в пленке Ge и взаимодействием между атомами Ge и Cr. Изучен тензорезистивный эффект в пленках на основе Cr, Ge и Cr, Cu, Sc. Проведено сравнение коэффициента продольной тензочувствительности однослойных и трехслойных пленок. Полученное отличие связано с вкладом в тензоэффект рассеивания электронов на границе раздела слоев

### Введение

Создание тонкопленочных элементов с малым  $\sim 10^{-4} - 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  значением термического коэффициента сопротивления (ТКС) и большой величиной  $\sim 10 - 10^2$  коэффициента тензочувствительности (КТ) является одной из актуальных задач пленочного материаловедения. Так, например, тензодатчики на основе металлических пленок являются более эффективными при повышенных температурах в сравнении с традиционными полупроводниковыми [1]. Элементы с низким значением ТКС и неизменным с температурой коэффициентом чувствительности также находят широкое применение в микроприборостроении.

Целью данной работы стало исследование температурной зависимости ТКС в многослойных пленках на основе Ti, Ni и Cr, Ge, а также влияния количества слоев на величину коэффициента тензочувствительности пленочных систем на основе Cr, Ge и Cr, Cu, Sc.

### 1. Методика эксперимента

Многослойные пленочные образцы были получены путем послойного осаждения в вакууме  $\sim 10^{-3} - 10^{-4} \text{ Па}$  на подложку при температуре  $T=300 \text{ K}$ . При этом использовались методы термического (слои Cr, Ge, Cu и Sc) и электронно-лучевого (слои Ti и Ni) испарения. Температурная зависимость электросопротивления в интервале 300-700 K исследовалась на подложках из стекла с оплавленными металлическими стержнями. Стабилизация электрических свойств осуществлялась по схеме "нагрев-охлаждение" на протяжении 3-4 циклов.

Для изучения тензорезистивного эффекта в пленках на основе Cr и Ge использовались подложки из фольгированного медью стеклотекстолита. Деформация до 0,06 % осуществлялась методом на

изгиб. Исследование тензоувствительности в случае систем на основе Cr, Cu и Sc проводилось путем деформации подложки с пленкой на растяжение ( $\epsilon_{\text{max}} = 1-2 \%$ ). Подложки изготавливались из фторопласта Ф4 и никелевой фольги, на которую был нанесен диэлектрический слой SiO путем совместного испарения порошков SiO<sub>2</sub> и Si в эквивалентном соотношении при  $T = 1470 \text{ K}$ . Методика создания электрических низкоомных контактов нами описана в работе [2].

Фазовый состав пленочных образцов и диффузионные процессы в них изучались методами электронографии (электронный микроскоп ЭММА-4) и вторичной ионной масс спектрометрии (прибор МС-7201М).

### 2. Термический коэффициент сопротивления пленочных систем

В пленках на основе Ti и Ni, которые отжигались при температурах 700 K, в целом фазовый состав можно интерпретировать как ГЦК-Ni + ГПУ-Ti со следами гексагонального интерметаллида Ni<sub>3</sub>Ti и оксида TiO<sub>2</sub>. Параметр решетки Ti и Ni отличается от аналогичной величины для массивных образцов, что обусловлено образованием твердых растворов.

Исследование температурной зависимости сопротивления в пленках титана показывает, что в них может наблюдаться уменьшение сопротивления с ростом температуры. Такой результат связан с поглощением пленкой титана в процессе ее конденсации газов из остаточной атмосферы и, в частности, кислорода, на что указывают следы оксида в его фазовом составе. Влияние этого процесса на электропроводность металлических пленок проявляется в появлении дополнительных локализованных энергетических уровней за пределами зоны проводимости [3], что обуславливает отрицательное значение ТКС  $\beta = \text{dln}R/\text{dT}$  (рис.1а).

При переходе к двухслойной пленке Ni/Ti/П (П – подложка), где вторым слоем является слабоактивная остаточные газы никель, зависимость сопротивления от температуры во всем интервале становится характерной для металлов ( $\beta$  – положительная величина), о чем свидетельствуют данные,

Проценко Сергей Иванович – СГУ (Украина), аспирант  
Токмань Валерий Васильевич – СГУ (Украина), инженер  
Черноус Анатолий Николаевич – СГУ (Украина), докторант, канд. физ.-мат. наук, доцент

приведенные на рис. 1 б. Конденсация третьего слоя из титана снова приводит к уменьшению значения ТКС. На рис. 3 б показано, что при определенном подборе толщин слоев никеля и титана можно получить пленку, которая имеет  $\beta \approx 0 \text{ K}^{-1}$ . Наличие минимумов на зависимости  $\beta(T)$  при температурах Дебая [4] ( $\theta_{\text{Д}}^{\text{Ni}} = 430 \text{ K}$ ,  $\theta_{\text{Д}}^{\text{Ti}} = 465 \text{ K}$ ) отражает особенности электрон-фононного взаимодействия при  $T \geq \theta_{\text{Д}}$ . Следовательно, чередуя слои Ni и Ti определенной толщины, можно управлять величиной и знаком ТКС пленочной системы в целом.

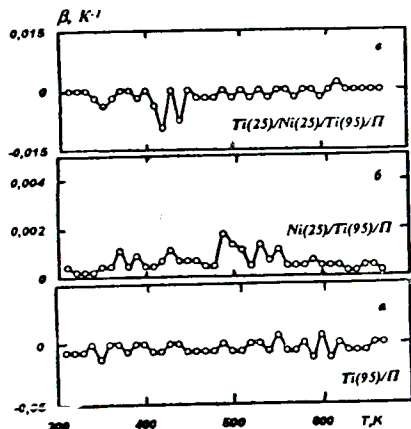


Рис.1. Зависимость  $\beta(T)$  при последовательном наращивании слоев Ni и Ti. В скобках указаны толщины слоев в нанометрах

Уменьшение ТКС по сравнению с однослойными пленками металлов можно получить в двух- и многослойных образцах на основе металлов и полупроводников. В случае пленочной системы полукристаллический Cr/ультрадисперсный Ge ТКС может принимать отрицательное значение. Хотя, если слой германия аморфный, ТКС является положительной величиной, а двухслойную систему Ge/Cr/Pi можно рассматривать относительно электрических свойств как пленку хрома с покрытием [5].

На рис.2 представлена температурная зависимость ТКС и коэффициента чувствительности  $S = d \ln R / d \ln T = \beta \cdot T$  для трехслойной пленочной структуры. Особенности этой зависимости объясняются, скорее всего, рекристаллизационными процессами в пленке германия и взаимодействием между атомами Ge и Cr при увеличении температуры. В связи с этим начиная с  $T = 500 \text{ K}$  будет иметь место зернограничная диффузия атомов хрома в пленку германия. Проблемы зернограничной диффузии имеют непосредственное отношение к температурной стабильности пленочных элементов. Поскольку она всегда имеет место в полукристаллических образцах, то независимо от степени объемной диффузии элементов возможно или фазообразование на границе раздела слоев, или сегрегация элементов на гра-

ницах зерен. Это оказывает влияние на электрические свойства пленочных систем.

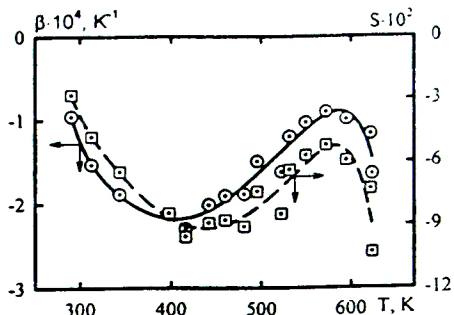


Рис.2. Зависимость  $\beta(T)$  и  $S(T)$  в трехслойной пленке Cr(65)/Ge(20)/Cr(65)/Pi

Влияние образующихся интерметаллидов на величину ТКС определить достаточно сложно. Сегрегация атомов по границам зерен обуславливает увеличение или уменьшение коэффициента зернограничного рассеяния. При его увеличении значение ТКС в целом уменьшается, а при уменьшении - наоборот. Вопрос о влиянии инородных атомов на величину параметров электропереноса анализировался в работе [6] при исследовании пленок никеля с тонким покрытием (толщиной меньше 10 нм) из аморфного германия. В [6] показано, что атомы германия, которые локализируются на границах зерен, частично залечивают дефектную структуру, что обуславливает увеличение ее прозрачности. Величина коэффициента зернограничного рассеяния уменьшается в пленках никеля с покрытием в среднем на 10 % по сравнению с образцами без покрытия.

### 3. Коэффициент тензочувствительности пленочных систем

Известно, см., например [1], что полупроводниковые материалы как в массивном, так и в пленочном состоянии обладают достаточно высоким  $10^2-10^3$  значением коэффициента тензочувствительности. Величина КТ в пленочных системах на основе Cr и Ge оказалась меньше ожидаемой. Так, коэффициенты продольной тензочувствительности  $\gamma_l$  для пленок Ge(10)/Cr(60)/Pi, Ge(10)/Cr(60)/Ge(10)/Cr(60)/Pi равны 6,0; 4,6 в отожженном и 8,2; 4,2 в неотожженном состоянии соответственно.

Полученное значение является несколько меньшим, чем в однослойных пленках хрома в интервале толщин от 60 до 120 нм. Низкое значение КТ связано, возможно, с шунтирующим действием слоя хрома и увеличением прозрачности межзеренных границ для носителей электрического тока в пленке хрома. Последнее обусловлено залечиванием дефектов на границах диффундирующими по ним атомами германия. Анализ в рамках термодинамического подхода показывает, что такой процесс является достаточно вероятным.

Сравнение КТ для одно- трехслойных пленочных систем одинаковой толщины

Пленочная система (д, нм)	Общая толщина, нм	$\gamma_1/\gamma_1^{Ge}$	$\gamma_1/\gamma_1^{Ni}$	$\gamma_1/\gamma_1^{Cr}$
Cu(119)/Sc(72)/Cr(73)/П	352	6,3	10,0	3,7
Cu(34)/Cr(70)/Sc(54)/П	158	6,3	11,1	4,8
Cr(42)/Cu(20)/Sc(145)/П	207	8,3	12,5	5,0
Cr(71)/Sc(25)/Cr(145)/П	244	14,3	25,0	8,3
Cu(26)/Cr(79)/Cu(49)/П	156	7,7	12,5	4,5

Большее значение КТ, чем в однослойных пленках, можно ожидать в многослойных системах, компоненты которых имеют крайне ограниченную растворимость. Примером такой системы являются пленки на основе Cr, Cu и Sc, для которых объемная растворимость меньше 1 ат.%. Эти металлы в массивном состоянии образуют системы Cr-Cu, Cr-Sc и Cu-Sc эвтектического типа без промежуточных фаз в первом и во втором случае и с промежуточными фазами с узкой областью гомогенности в третьем [7]. Это относится и к пленочным образцам, что подтверждается исследованием фазового состава методом электронографии. Изучение диффузионных процессов показывает, что в системах на основе Cr, Cu и Sc, хотя и происходит взаимная диффузия, но в целом сохраняется индивидуальность отдельных слоев даже после отжига при 700 К. Таким образом, в многослойных пленках на основе этих металлов межфазную границу можно рассматривать как дополнительный механизм рассеивания электронов.

В таблице представлены данные сравнения величины КТ материала каждого слоя и трехслойных пленок примерно одинаковой толщины. Из приведенных результатов следует, что однослойные пленки имеют меньшее значение коэффициента продольной тензочувствительности. Это можно объяснить возникновением дополнительного механизма рассеивания носителей заряда на границе раздела отдельных слоев. Следовательно, многослойные пленки на основе металлов являются более эффективным материалом для изготовления тензорезисторов по сравнению с однослойными пленками металлов и многослойными образцами на основе металлов и полупроводников.

#### Выводы

Исходя из результатов работы можно сделать следующие выводы:

- чередованием слоев никеля и титана можно управлять знаком и величиной ТКС в многослойной

Сумской государственный университет

#### FORMATION OF MULTILAYER FILMS STRUCTURES WITH A NEGATIVE THERMAL RESISTANCE COEFFICIENT AND ENLARGED COEFFICIENT OF TENSOSENSIBILITY. S.I.Proczenko, V.V.Tokman, A.M.Chomous

Experimental results of temperature dependence of a thermal resistance coefficient TCR of film systems on a basis Ti, Ni and Cr, Ge represented. The negative value TCR of Ti films connected with absorbed of layer Ti of impurity gases from a residue atmosphere, and in second case, most likely, with processes of recrystallization in Ge film and interaction between atoms Ge and Cr. Effect of tensosensibility in single and three-layer films is studied. Received difference is connected with scattering of electron on boundary of separate layers.

пленке, что дает возможность рассматривать такую систему как резистивный материал с наперед заданными свойствами;

- многослойные пленки, компоненты которых имеют крайне ограниченную объемную растворимость, вследствие появления в них дополнительного механизма рассеивания электронов, имеют большее значение КТ по сравнению с однослойными такой же толщины, что открывает перспективы их использования при создании температуростойких терморезисторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Клокова Н.П. Тензорезисторы. - М.: Машиностроение, 1990. - 222 с.
2. Проценко С.И., Чорноус А.Н. Особенности размерного эффекта тензочувствительности в одно- и трехслойных пленках на основе Cr, Cu и Sc // Сборник докладов 14-го Международного симпозиума "Тонкие пленки в оптике и электронике". - Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2002. - С. 136-140.
3. Маделунг О. Физика твердого тела. Локализованные состояния. - М.: Наука, 1985. - 184 с.
4. Физико-химические свойства элементов: Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. - Киев: Наукова думка, 1965. - 807 с.
5. Особливості розмірного ефекту в електропровідності двошарових плівок з відмінним температурним коефіцієнтом опору / А.М.Чорноус, Ю.М. Овчаренко, О.В. Шовкопляс, С.І. Проценко // Вісник Сумського державного університету. - 1997. - №1. - С. 95-99.
6. Розрахунок параметрів електропереносу тонких металевих плінок в умовах зовнішнього та внутрішнього розмірних ефектів / Ю.М. Овчаренко., Н.М. Опанасюк, І.Ю. Проценко, О.В. Шовкопляс // УФЖ. - 1997. - Т. 42, №7. - С. 826-830.
7. Диаграммы состояния металлических систем. / Под ред. Н.П. Лякишева. - М.: Машиностроение, 1997. - Т. 2. - 1023 с.