

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Физико-технический институт

**В. А. Зеленин**

# **ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СТРУКТУРЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Минск  
«Беларуская навука»  
2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Перечень условных обозначений</b> .....	3
<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава 1. Строение и стабильность свойств тонкопленочных материалов и многослойных структур</b> .....	7
1.1. Тенденции развития технологии формирования тонкопленочных структур . . . .	7
1.2. Электронное строение и свойства однокомпонентных материалов . . . . .	10
1.3. Электронное строение и свойства химических соединений . . . . .	13
1.4. Строение и свойства полимерных материалов . . . . .	15
1.4.1. Структурно-фазовое состояние полимеров . . . . .	15
1.4.2. Основные свойства полимеров . . . . .	17
1.5. Строение и свойства многокомпонентных расплавов . . . . .	19
1.6. Сплавы для токопроводящих систем и резистивных элементов интегральных микросхем . . . . .	22
1.6.1. Сплавы на основе алюминия . . . . .	22
1.6.2. Многослойные и многоуровневые токопроводящие системы . . . . .	26
1.6.3. Сплавы для резистивных элементов интегральных микросхем . . . . .	29
1.7. Стабильность свойств многослойных пленок и структур . . . . .	33
Выводы . . . . .	36
<b>Глава 2. Термодинамика фазовых переходов при осаждении тонких пленок</b> .....	38
2.1. Фазовые превращения в однокомпонентных материалах . . . . .	38
2.2. Равновесное давление паров конденсированных фаз . . . . .	39
2.3. Давление насыщенного пара элементов . . . . .	43
2.4. Давление насыщенных паров растворов и смесей . . . . .	44
2.5. Термическая диссоциация химических соединений . . . . .	47
2.6. Особенности нанесения пленок полимеров . . . . .	51
2.6.1. Термическая абляция полимеров . . . . .	51
2.6.2. Ионно-плазменное распыление полимеров . . . . .	53
2.6.3. Диссоциация и полимеризация органических соединений в плазме тлеющего разряда . . . . .	54
2.6.4. Молекулярное диспергирование полимеров . . . . .	56
2.7. Фазовые переходы $ж \rightarrow пар$ и $тт \rightarrow пар$ многокомпонентных систем . . . . .	57
2.7.1. Фазовый переход $ж \rightarrow пар$ . . . . .	58
2.7.2. Фазовый переход $тт \rightarrow пар$ . . . . .	60
Выводы . . . . .	64

<b>Глава 3. Сплавы для резистивных пленок, получаемых методами испарения и распыления</b> .....	66
3.1. Получение многокомпонентных пленок однородного состава .....	66
3.2. Влияние технологических факторов на свойства резистивных пленок .....	70
3.3. Сплавы для резистивных пленок, получаемых методами испарения .....	74
3.3.1. Выбор компонентов сплавов .....	74
3.3.2. Азеотропность как принцип формирования систем сплавов .....	75
3.3.3. Определение концентраций компонентов в сплавах .....	76
3.4. Расчет элементного состава резистивных сплавов .....	78
3.4.1. Метод расчета .....	78
3.4.2. Расчеты составов сплавов различных систем .....	80
3.4.3. Стабильность состава и свойств пленок новых сплавов .....	88
3.5. Сплавы для резистивных пленок, получаемых методами распыления .....	93
3.5.1. Анализ свойств сплавов серии РС систем Ni–Cr–Si и Co–Cr–Si .....	94
3.5.2. Расчет температур плавления и координат эвтектик в системе Ni–Cr–Si .....	96
3.5.3. Расчет температур плавления и координат эвтектик в системе Ni–Cr–La–Si .....	99
3.5.4. Расчет температур плавления и координат эвтектик в системе Co–Cr–Si .....	100
3.5.5. Расчет температуры плавления эвтектик в системе Co–Cr–La–Si .....	102
3.6. Структура и фазовый состав резистивных пленок .....	103
3.6.1. Структура пленок сплавов системы Fe–Cr–Si–W .....	103
3.6.2. Структура пленок системы Al–Cr–Si–CeO <sub>2</sub> .....	107
3.6.3. Фазовый состав резистивных пленок .....	108
3.7. Электрические свойства резистивных пленок .....	113
3.7.1. Свойства пленок систем Fe–Cr–Si и Fe–Cr–Si–W .....	113
3.7.2. Свойства пленок систем Ni–Cr–Si и Ni–Cr–Al, полученных методом испарения .....	116
3.7.3. Свойства пленок сплавов системы Cr–Ni–Si, полученных методом магнетронного распыления .....	119
Выводы .....	121
<b>Глава 4. Сплавы для резисторов с повышенной стабильностью</b> .....	124
4.1. Расчет эвтектического состава сплава системы Cr–Mo–Si .....	125
4.2. Выбор переходного металла для снижения температуры плавления систем Cr–Mo – переходный металл – Si .....	127
4.3. Расчет эвтектических составов сплавов системы Cr–Mo–Ni–Si .....	129
4.3.1. Расчет эвтектического состава сплава системы Cr–Mo–Ni .....	129
4.3.2. Расчет эвтектического состава сплава системы Mo–Ni–Si .....	130
4.4. Выбор РЗМ для снижения температур плавления четырехкомпонентной системы Cr–Mo–Ni–Si .....	134
4.5. Расчет эвтектических составов сплавов в системах Cr–Mo–Ni–Y–Si и Cr–Mo–Ni–La–Si .....	137
4.5.1. Расчет системы Cr–Mo–Ni–Y–Si .....	137
4.5.2. Расчет системы Cr–Mo–Ni–La–Si .....	143
4.6. Технологии изготовления мишеней из резистивных сплавов .....	149
4.7. Поиск эвтектического состава сплава системы Mn–Co–La–Si .....	153
4.8. Влияние термообработки на структуру и фазовый состав резистивных пленок систем Cr–Ni–La–Si и Mn–Co–La–Si .....	157
4.8.1. Структура пленок системы Cr–Ni–La–Si .....	158
4.8.2. Структура, элементный и фазовый состав резистивных пленок системы Mn–Co–La–Si .....	159

4.9. Электрические свойства резистивных пленок систем Cr–Ni–Si, Cr–Ni–La–Si, Mn–Co–La–Si и тестовых резисторов .....	163
4.9.1. Электрические свойства пленок системы Cr–Ni–La–Si .....	163
4.9.2. Электрофизические свойства пленок системы Mn–Co–La–Si .....	165
4.9.3. Влияние термообработки на электрические свойства пленок системы Cr–Co–La–Si эвтектического состава .....	167
Выводы .....	168
<b>Глава 5. Токопроводящие системы интегральных микросхем: сплавы, мишени, структура, свойства .....</b>	<b>170</b>
5.1. Токопроводящие системы на основе алюминия .....	170
5.1.1. Выбор легирующих элементов .....	171
5.1.2. Выбор систем и составов сплавов на основе алюминия .....	173
5.2. Мишени из сплавов на основе алюминия .....	180
5.2.1. Технология изготовления мишеней .....	180
5.2.2. Процесс распыления мишеней .....	182
5.2.3. Распределение легирующих элементов в литых мишенях .....	186
5.3. Термостабильность и микрорельеф поверхности пленок .....	190
5.3.1. Структура пленок .....	190
5.3.2. Микрорельеф поверхности пленок .....	193
5.4. Состав, структура и электрофизические свойства токопроводящих систем .....	196
5.4.1. Тестовые структуры .....	196
5.4.2. Химический состав пленок и тестовых структур .....	197
5.4.3. Микрорельеф поверхности и качество рисунка структур .....	199
5.4.4. Электрофизические свойства ТС .....	203
5.4.5. Прочность сварных соединений пленка – вывод .....	205
5.5. Токопроводящие системы на основе оксидных пленок .....	208
5.5.1. Структура пленок InSn и $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ .....	209
5.5.2. Свойства пленок $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ .....	211
5.6. Механизмы формирования ямок в контактных окнах при термообработке структур Si (111)/SiO <sub>2</sub> /Al .....	215
5.6.1. Моделирование процесса формирования ямок в структурах Si (111)/SiO <sub>2</sub> /Al .....	216
5.6.2. Экспериментальные исследования процесса формирования ямок в структурах Si (111)/SiO <sub>2</sub> /Al .....	219
5.6.3. Влияние ориентации контактных окон на конфигурацию ямок в Si(111) .....	221
Выводы .....	222
<b>Глава 6. Стабилизация свойств твердотельных структур изделий микро- и нанoeлектроники .....</b>	<b>226</b>
6.1. Влияние барьерных слоев на стабильность свойств кремниевых структур .....	226
6.2. Строение и свойства структур Al/Mo/Si .....	229
6.2.1. Строение поверхностного слоя эпитаксиальных структур .....	229
6.2.2. Строение переходного слоя структур Mo/Si .....	232
6.2.3. Фазовые превращения в переходной зоне структур Mo/Si .....	234
6.2.4. Механизмы формирования соединений в переходной области структур Mo/Si .....	237
6.3. Особенности формирования кремниевых структур с проектными нормами субмикронных размеров .....	242
6.3.1. Анализ диаграмм состояния систем Al–PЗМ и Si–PЗМ .....	244
6.3.2. Фазовый состав переходных слоев структур Al/Y/Si .....	248

6.3.3. Термостабильность слоистых пленок иттрий/алюминий .....	250
6.3.4. Влияние стационарной и импульсной ТО на переходные сопротивления в структурах Al/Y/Si .....	255
6.3.5. Влияние импульсной ТО на электрические свойства резистивных пленок системы Ni-Cr-Y-Si .....	256
6.4. Напряженно-деформированное состояние кремниевых структур .....	257
6.4.1. Методы определения остаточных напряжений в кремниевых структурах	257
6.4.2. Совершенствование методов определения остаточных напряжений в структурах SiO <sub>2</sub> /Si .....	261
6.5. Перспективы использования полимерных материалов при изготовлении ИЭТ ..	267
6.5.1. Структуры с тензорезистивным эффектом .....	267
6.5.2. Структуры с пьезоэффектом .....	269
6.5.3. Токпроводящие системы из органических макромолекул .....	270
Выводы .....	274
<b>Список использованных источников .....</b>	<b>276</b>