

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-технологическая академия

**Н. В. ГАПОНЕНКО**  
**Л. П. МИЛЕШКО**

**ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ  
ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДАМИ  
ЗОЛЬ-ГЕЛЬ–ТЕХНОЛОГИИ И АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ**

*Учебное пособие*

Ростов-на-Дону – Таганрог  
Издательство Южного федерального университета  
2019

УДК 541.1(075.8)

ББК 24я73

Г199

*Печатается по решению кафедры техносферной безопасности и химии Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (протокол № 9 от 3 апреля 2019 г.)*

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» *Л. М. Лыньков*  
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета *Н. В. Кулешов*

**Гапоненко, Н. В.**

Г199 Основы процессов получения легированных оксидных пленок методами золь-гель-технологии и анодного окисления : учебное пособие / Н. В. Гапоненко, Л. П. Милешко ; Южный Федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2019. – 152 с.

ISBN 978-5-9275-3182-0

Междисциплинарное учебное пособие, предназначенное для факультативного изучения студентами магистратуры, обучающимися по направлениям подготовки «Техносферная безопасность», «Нанотехнологии и микросистемная техника» и «Конструирование и технология электронных средств».

Рассмотрены основные закономерности образования, свойства и примеры использования золь-гель-пленок легированных лантаноидами на планарных подложках и в мезоскопических порах пористого кремния, пористого анодного оксида алюминия и синтетических опалов, а также легированных фосфором или бором анодных оксидных пленок кремния, карбида кремния, нитрида кремния и легированных хлором – меди (I).

УДК 541.1(075.8)

ББК 24я73

ISBN 978-5-9275-3182-0

© Южный федеральный университет, 2019

© Гапоненко Н. В., Милешко Л. П., 2019

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ТОНКИХ ПЛЕНОК ЗОЛЬ-ГЕЛЬ-МЕТОДОМ .....	6
1.1. Общие закономерности эволюции системы золь-гель-ксерогель .....	6
1.2. Формирование тонких пленок золь-гель-методом .....	14
1.3. Синтез микропористых ксерогелей в мезопористых матрицах .....	31
<i>Контрольные вопросы</i> .....	52
2. ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЛАНТАНОИДОВ В ПОРИСТОМ КРЕМНИИ, СИНТЕТИЧЕСКИХ ОПАЛАХ И В СТРУКТУРЕ МИКРОПОРИСТЫЙ КСЕРОГЕЛЬ/МЕЗОПОРИСТЫЙ АНОД-НЫЙ ОКСИД АЛЮМИНИЯ .....	54
2.1. Анализ фотолюминесценции на 1,5 мкм в структуре ксерогель/пористый кремний, содержащей эрбий .....	54
2.2. Фотолюминесценция эрбия в пленках ксерогелей, сформированных на макропористом и поликристаллическом кремнии .....	59
2.3. Влияние оптических свойств синтетических опалов на фотолюминесценцию тербия .....	65
2.4. Люминесценция структуры микропористый ксерогель/мезопористый анодный оксид алюминия, легированной лантаноидами .....	73
2.5. О механизме возрастания фотолюминесценции лантаноидов в структуре микропористый ксерогель/мезопористый анодный оксид алюминия .....	85
2.5.1. Возбуждение иона через матрицу ксерогеля в пористом анодном оксиде алюминия .....	87
2.5.2. Прямое возбуждение иона лантаноида в структуре микропористый ксерогель/ мезопористый анодный оксид алюминия .....	88
2.5.3. Возбуждение иона через матрицу анодного оксида алюминия. Многократное рассеяние света в пористом анодном оксиде алюминия .....	88
<i>Контрольные вопросы</i> .....	91
3. АНОДНОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ, КАРБИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ В ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ .....	92

3.1. Механизмы взаимодействия компонентов электролитов с Si, SiC и Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	92
3.2. Кинетика роста ЛАОП кремния, карбида и нитрида кремния ..	95
3.3. Состав, строение и свойства ЛАОП кремния .....	101
3.4. Диффузия фосфора в кремний из анодных оксидных пленок в условиях быстрой термической обработки (БТО) .....	103
3.5. Технологические возможности использования ЛАОП для создания элементов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем .....	106
<i>Контрольные вопросы</i> .....	113
<b>4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И СВОЙСТВА АНОДНОГО ОКСИДА МЕДИ (I)</b> .....	115
4.1. Описание экспериментальной установки и условий получения анодного оксида меди (I) .....	115
4.2. Термодинамические закономерности процесса формирования анодного оксида меди (I) .....	118
4.3. Кинетические закономерности процесса формирования анодного оксида меди (I) .....	123
4.4. Элементный состав анодного оксида меди (I) .....	127
4.5. Фазовый состав анодного оксида меди (I) .....	129
4.6. Морфология поверхности анодного оксида меди (I) .....	130
4.7. Зависимость сопротивления анодного оксида меди (I) от температуры и освещенности .....	133
4.8. Зависимость вольт-амперных характеристик анодного оксида меди (I) от температуры и освещенности .....	135
4.9. Газочувствительные характеристики сенсоров газов на основе анодного оксида меди (I) .....	138
<i>Контрольные вопросы</i> .....	145
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	146
Используемая литература .....	147