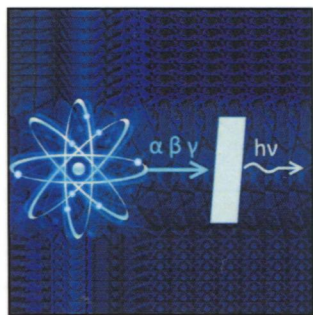


# Физики и техники

С.В. Никифоров,  
В.С. Кортюв

Радиационно –  
индуцированные  
процессы в широкозонных  
нестехиометрических  
оксидных диэлектриках



ТЕХНОСФЕРА



# **М И Р** **ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ**

С.В. Никифоров,  
В.С. Кортюв

**Радиационно–индуцированные  
процессы в широкозонных  
нестехиометрических  
оксидных диэлектриках**

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2017

УДК 539.21: 535.37  
ББК 22.379: 22.345  
Н63

**Н63 Никифоров С.В., Кортюв В.С.**

**Радиационно-индуцированные процессы в широкозонных  
нестехиометрических оксидных диэлектриках  
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 272 с. ISBN 978-5-94836-490-2**

В книге рассмотрены радиационно-индуцированные процессы, возникающие при взаимодействии ионизирующих излучений с веществом, положенные в основу дозиметрических измерений. Особое внимание уделено методам твердотельной дозиметрии на основе термостимулированной люминесценции. Описаны механизмы образования анионных дефектов в объемных и наноструктурных широкозонных оксидных диэлектриках, проведено сравнение их люминесцентных и дозиметрических свойств. Приведен обзор и анализ различных типов кинетических моделей термостимулированной люминесценции, в том числе основанных на конкурирующем влиянии глубоких ловушек. Описаны эффекты сенситизации люминесценции в широкозонных оксидах, обусловленные изменением заселенности глубоких центров. Представлены результаты, доказывающие решающую роль процессов температурно-зависимого захвата носителей заряда глубокими ловушками в формировании люминесцентных и дозиметрических свойств данного класса материалов. Приводятся сведения о дозиметрических характеристиках и применении термолюминесцентных детекторов ионизирующих излучений ТЛД-500К на основе анион-дефектного оксида алюминия.

Книга адресована широкому кругу читателей – специалистам по физике конденсированного состояния, радиационной физике диэлектрических материалов, инженерам, работающим в области индивидуальной, медицинской и технологической дозиметрии и радиационного мониторинга. Она может быть также полезна аспирантам и студентам старших курсов.

УДК 539.21: 535.37  
ББК 22.379: 22.345

© 2017, С.В. Никифоров, В.С. Кортюв  
© 2017, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-490-2

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	6
Сведения об авторах . . . . .	10
Список основных сокращений и обозначений . . . . .	11
<b>Глава 1. Дозовые эффекты в конденсированных средах под действием излучений . . . . .</b>	<b>12</b>
1.1. Первичные процессы . . . . .	12
1.2. Вторичные процессы . . . . .	20
<b>Глава 2. Методы радиационных измерений . . . . .</b>	<b>29</b>
2.1. Измерения мощности дозы . . . . .	29
2.1.1. Полупроводниковые детекторы . . . . .	29
2.1.2. Сцинтилляционные детекторы . . . . .	34
2.2. Измерения поглощенной дозы . . . . .	37
2.2.1. Калориметрический метод . . . . .	37
2.2.2. ЭПР-дозиметрия . . . . .	38
2.2.3. Люминесцентная дозиметрия . . . . .	41
ТСЛ- и ОСЛ-дозиметрия . . . . .	41
Радиофотолюминесцентная дозиметрия . . . . .	58
2.2.4. ТСЭЭ-дозиметрия . . . . .	60
<b>Глава 3. Кинетические модели термостимулированной люминесценции . . . . .</b>	<b>62</b>
3.1. Зонная схема обобщенной модели ТСЛ в широкозонных материалах . . . . .	63
3.2. Дифференциальные кинетические уравнения . . . . .	64
3.3. Общие подходы к решению систем кинетических уравнений . . . . .	67
3.4. Кинетические параметры . . . . .	69
3.5. Краткий обзор основных типов кинетических моделей ТСЛ . . . . .	71
3.6. Кинетические модели ТСЛ с учетом конкурирующего влияния глубоких ловушек . . . . .	73
3.6.1. Модель конкурирующих электронных ловушек . . . . .	73
3.6.2. Модель конкурирующих центров рекомбинации . . . . .	79
3.6.3. Модель одновременной конкуренции между электронными ловушками и центрами рекомбинации . . . . .	82
<b>Глава 4. Люминесцентные свойства нестехиометрических оксидных диэлектриков . . . . .</b>	<b>86</b>
4.1. Способы создания анионных дефектов в оксидах . . . . .	87
4.2. Центры люминесценции в анион-дефектных монокристаллах оксида алюминия . . . . .	89

4.3. Люминесцирующие керамики оксидов алюминия, циркония и магния . . . . .	96
4.3.1. Анион-дефектная ультрадисперсная керамика оксида алюминия. . . . .	96
4.3.2. Наноструктурный моноклинный диоксид циркония . . .	102
4.3.3. Ультрадисперсная керамика оксида магния. . . . .	105
4.4. Глубокие ловушки в широкозонных оксидах . . . . .	111
<b>Глава 5. Эффекты сенситизации и десенситизации термолюминесценции в облученных оксидных диэлектриках. . . . .</b>	<b>114</b>
5.1. Высокотемпературная ТСЛ в анион-дефектном оксиде алюминия после возбуждения различными видами излучений	115
5.1.1. УФ-облучение. . . . .	115
5.1.2. Рентгеновское излучение. . . . .	120
5.1.3. Импульсный электронный пучок. . . . .	121
5.2. Влияние заселенности глубоких ловушек на ТСЛ дозиметрического пика в оксиде алюминия . . . . .	123
5.2.1. Сенситизация ТСЛ после заполнения глубоких ловушек при постоянной температуре. . . . .	124
5.2.2. Сенситизация ТСЛ после ступенчатого заполнения и опустошения глубоких ловушек при разных температурах. . . . .	127
Заполнение глубоких ловушек УФ-излучением . . . . .	128
Заполнение глубоких ловушек рентгеновским излучением . . . . .	129
Заполнение глубоких ловушек импульсным электронным пучком. . . . .	130
5.3. Электронные и дырочные глубокие центры захвата в анион-дефектном оксиде алюминия. . . . .	132
5.4. Роль дырочных ловушек в ТСЛ дозиметрического пика в АДК оксида алюминия . . . . .	137
5.5. Сенситизация ТСЛ мелких ловушек в АДК оксида алюминия	146
5.6. ТСЛ глубоких ловушек и сенситизация в анион-дефектном оксиде магния . . . . .	152
<b>Глава 6. Температурная зависимость процессов конкурирующего взаимодействия ловушек в облученных широкозонных оксидах . . . . .</b>	<b>158</b>
6.1. Температурная зависимость вероятности захвата носителей заряда на глубокие центры в модели конкурирующих электронных ловушек . . . . .	158
6.2. Тушение ТСЛ в дозиметрическом пике оксида алюминия . . .	161
6.2.1. Радиационно окрашенные монокристаллы . . . . .	161
6.2.2. Ультрадисперсная анион-дефектная керамика . . . . .	163
6.3. Тушение ТСЛ глубоких ловушек . . . . .	164
6.4. Особенности фототрансферной термолюминесценции . . . . .	170

6.5. Роль глубоких ловушек в формировании сверхлинейности дозовой зависимости ТСЛ . . . . .	174
6.5.1. Результаты эксперимента . . . . .	175
6.5.2. Результаты расчета . . . . .	177
6.6. Температурная ионизация F-центров в анион-дефектном оксиде алюминия . . . . .	181
6.6.1. Экспериментальные подтверждения термической ионизации F-центров . . . . .	182
6.6.2. Зонная схема и математическое описание модели . . . . .	184
6.6.3. Результаты моделирования . . . . .	188
Температурная зависимость заполнения ловушек . . . . .	188
Температурное тушение люминесценции. . . . .	189
6.7. Безызлучательная релаксация электронных возбуждений в моноклинном диоксиде циркония. . . . .	190
6.7.1. Зависимость квантового выхода ФЛ от температуры . . . . .	192
6.7.2. ТСЛ наноструктурного диоксида циркония и ее кинетические параметры. . . . .	193
6.7.3. Влияние скорости нагрева на светосумму ТСЛ наноструктурного диоксида циркония. . . . .	195
6.7.4. Физическая интерпретация механизма и параметров температурного тушения люминесценции . . . . .	198
<b>Глава 7. Применение детекторов ТЛД-500К на основе анион-дефектного оксида алюминия в люминесцентной дозиметрии ионизирующих излучений . . . . .</b>	<b>202</b>
7.1. Индивидуальная дозиметрия . . . . .	203
7.2. Высокодозные измерения . . . . .	209
7.3. Модификация дозиметрических свойств детекторов. . . . .	215
7.3.1. Термооптическая обработка . . . . .	215
7.3.2. Повторное измерение дозиметрического ТСЛ-сигнала. . . . .	218
7.3.3. Термолучевая подготовка детекторов к экспозициям . . . . .	220
7.3.4. Методика измерения дозы тепловых нейтронов и смешанных полей . . . . .	222
Литература . . . . .	227
Предметный указатель . . . . .	260