



**ВВЕДЕНИЕ В
ФЕМТОНАНОФОТОНИКУ**

Учебное пособие

ВВЕДЕНИЕ В ФЕМТОНАНОФОТОНИКУ фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов

Под общей редакцией С.М. Аракеляна

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата 200400 (200200) «Оптическое приборостроение», 200500 «Лазерная техника и лазерные технологии», 200700 (200600) «Фотоника и оптоинформатика» и специальностям 200200 «Оптическое приборостроение» и 200201 «Лазерная техника и лазерные технологии»



Москва • 2015 • Логос

УДК 535.015
ББК 3.22.34
А79

Рецензенты

В.А. Быков, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке научно-исследовательского института физических проблем им. Ф.В. Лукина, заместитель заведующего кафедрой микро- и наноэлектроники ФФКЭ МФТИ

С.П. Зимин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микроэлектроники и общей физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова

Аракелян С.М.

А79 Введение в фемтонанопонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов: учебное пособие / С.М. Аракелян, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев, В.Г. Рау, А.Г. Сергеев; под общ. ред. С.М. Аракеляна. – М.: Логос, 2015. – 744 с.

ISBN 978-5-98704-812-2

Изложены базовые принципы и фундаментальные основы современной фемтонанопоники с акцентом на перспективы практического использования ее достижений. Рассмотрены вопросы статистической физики и термодинамики наноструктур с применением методов математического моделирования их направленного конструирования. Приведены результаты по лазерному синтезу нанокластерной материи – обсуждаются основные подходы и характеристики, включая лазерно-индуцированное возбуждение нелинейных гидродинамических явлений со стохастическим поведением и фрактальных структур в различных материалах в гибридных экспериментальных схемах, а также методы лазерной диагностики в реальном масштабе времени развития нелинейных динамических процессов и методы электронной и зондовой микроскопии. Проанализированы структурные фазовые переходы и коррелированные макроскопические состояния при управляемом лазерном формировании наночастиц на поверхности твердых тел, в том числе в аспекте проявления размерных эффектов и их квантовых аналогов. Затронуты вопросы метрологического обеспечения нанотехнологий и наноизмерений.

Для студентов, обучающихся в высших учебных заведениях по направлениям подготовки «Оптехника», «Лазерная техника и лазерные технологии», «Фотоника и оптоинформатика», специальностям «Оптехника» и «Лазерная техника и лазерные технологии». Для преподавателей вузов, обеспечивающих проведение учебных занятий в области нанотехнологий и связанной с ними тематикой. Представляет интерес для ученых и специалистов, разрабатывающих проблемы фемтонанопоники.

УДК 535.015
ББК 3.22.34

ISBN 978-5-98704-812-2

© Аракелян С.М., Кучерик А.О., Прокошев В.Г.,
Рау В.Г., Сергеев А.Г., 2015
© Логос, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	12
Часть I. Фундаментальные основы термодинамики и статистической физики наноструктур и методы математического моделирования направленного их конструирования	18
Введение	18
Глава 1. Статистическая физика	21
1.1. Фазовое пространство термодинамической системы	21
1.2. Распределение молекул газа по объему (распределение Пуассона).....	25
1.3. Распределение вероятностей по проекциям скоростей молекул идеального газа (распределение Максвелла I)	27
1.4. Распределение вероятностей по величине скорости молекул идеального газа (распределение Максвелла II).....	30
1.5. Распределение вероятностей по величине энергии молекул идеального газа. Теорема о средней кинетической энергии.....	32
1.6. Классическая статистика. Распределение Максвелла – Больцмана.....	33
1.7. Микрообъекты. Распределение состояний по энергии в фазовом пространстве.....	38
1.8. Статистика фермионов. Распределение Ферми–Дирака	41
1.9. Статистика бозонов. Распределение Бозе – Эйнштейна	47
1.10. Явления сверхтекучести жидкости и сверхпроводимости вещества с точки зрения статистики.....	52
Глава 2. Термодинамика	55
2.1. Функции состояния термодинамической системы	55
2.2. Энергетический баланс в термодинамической системе. Первый закон термодинамики	58
2.3. Термодинамические изопроцессы.....	63
2.4. Циклические процессы. Второй закон термодинамики	64
2.5. Характеристические функции. Термодинамические потенциалы	70
2.6. Тепловая теорема Нернста. Принцип недостижимости абсолютного нуля температур. Способы получения низких температур.....	75
2.7. Система в термостате. Распределение Гиббса	77
2.8. Связь статистической физики и термодинамики. Формула Больцмана для энтропии.....	80
2.9. Уравнение состояния реального газа Ван-дер-Ваальса. Межмолекулярное взаимодействие.....	84

2.10. Многофазные гетерогенные системы. Правило фаз Гиббса	88
2.11. Нелинейные процессы в термодинамике. Тепловые структуры. Понятие о синергетике. Кинетическое уравнение Больцмана.....	93
2.12. Кристаллическое состояние вещества. Моделирование роста кристаллов. Наноструктуры.....	104
Выводы	122
Тестовые вопросы и задания	125
Список литературы.....	134

ЧАСТЬ II. Лазерный синтез нанокластерной материи – основные особенности, методы и характеристики

Введение	136
----------------	-----

Глава 3. Лазерные методы получения наноструктурированных материалов.....

3.1. Осаждение методом PVD (Physical Vapor Deposition).....	145
3.2. Осаждение методом CVD (Chemical Vapor Deposition).....	146
3.3. Подходы на основе возбуждения лазерной плазмы.....	147
3.4. Образование пространственно-неоднородных структур из жидкой фазы	148
3.5. Общие представления об эффекте лазерной абляции	152
3.6. Лазерная абляция материала в жидкостях	160
3.7. Лазерное осаждение металлов из растворов	163
3.8. Активация поверхности подложки	165
3.9. Активация поверхности подложки физическим механизмом.....	167
3.10. Химическая активация поверхности подложки	168
3.11. Лазерные методы получения полупроводниковых наночастиц.....	168
3.12. Формирование субмикронных и наноструктур на поверхности углеродосодержащих материалов под действием лазерного излучения	169
3.12.1. Наночастицы, нанокластеры, наноструктуры и методы их получения в поле лазерного излучения	170
3.12.2. Аллотропные формы углерода. Углеродные нанотрубки.....	170
3.12.3. Получение нанотрубок и наноструктур.....	177

Глава 4. Лазерный синтез нанокластерных структур – коррелированные состояния и аналоги.....

4.1. Распространение света в сильно неоднородной среде – аналогия с явлением андерсоновской локализации для электронов и квантовыми макроскопическими состояниями конденсации	183
4.2. Образование кластеров. Основные физические следствия для наноструктурированных материалов	191
4.3. Электропроводимость наноструктурированных слоев	200

4.4. Роль поверхностных эффектов в развитии структурных фазовых переходов при наноструктурировании материалов	204
4.5. Аналогия с коррелированными состояниями конденсированной среды ...	213
4.5.1. Коррелированное состояние ансамбля наночастиц	213
4.5.2. Аналогия с квантовыми фазовыми переходами	218
4.6. Кинетический подход к анализу физических механизмов, ответственных за лазерно-индуцированное формирование ансамбля наночастиц	221
4.7. Итоговое обсуждение	225
Глава 5. Структурные фазовые переходы. Эксперимент и методы анализа	226
5.1. Эксперименты по лазерному возбуждению наноструктур и результаты их диагностики	226
5.1.1. Образование ансамбля наночастиц с бимодальным распределением по размерам при воздействии непрерывного лазерного излучения на полупроводниковые пленки РbТе	227
5.1.2. Лазерный синтез кластеров в коллоидных растворах и основные их характеристики	231
5.1.3. Формирование металлоуглеродных соединений в процессе лазерного воздействия	236
5.1.4. Образование наноструктурированной поверхности на подложке при лазерной абляции с поверхности мишени	240
5.1.5. Исследование титановых тонких пленок, полученных при фемтосекундной лазерной абляции	241
5.2. Теоретическая интерпретация экспериментов и процедуры расчета	246
5.2.1. Бимодальное распределение наночастиц в рамках дефектно-деформационной модели и возможные ее следствия для описания локализации коррелированных состояний в кластерных системах	246
5.2.2. Использование методов фрактальной геометрии для анализа морфологических свойств и управления качеством получаемого информационного наноструктурированного массива по результатам АСМ-измерений	255
5.2.3. Преимущества метода	264
5.2.4. Диффузионные процессы в коллоидных системах. Эффекты фрактальной размерности	264
5.2.5. Наноструктурирование поверхности при лазерной абляции – общий анализ в рамках кластерного подхода на основе методов фрактальной геометрии	267
5.3. Электрофизические свойства металлических/полупроводниковых микроконтактов кластерного типа на твердой подложке, полученных	

методом лазерного осаждения фрактальных структур наночастиц из коллоидных систем.....	268
5.3.1. Электрофизические свойства наноструктур	269
5.3.2. Эксперимент	271
5.3.3. Фрактальная модель и обсуждение	273
5.3.4. Основные физические следствия для наноструктурированных электропроводящих слоев и перспективы дальнейших исследований.....	278
5.4. Оптоэлектронные свойства биметаллических комплексов благородных металлов.....	282
5.4.1. Методика эксперимента по осаждению биметаллических кластеров; оценки влияния размерных эффектов.....	284
5.4.2. Условия и результаты эксперимента по лазерной абляции наночастиц из коллоидной системы.....	286
5.4.3. Оптические свойства осажденных структур.....	289
Выводы	291
Тестовые вопросы и задания	293
Список литературы.....	294

Часть III. Микро- и наноструктуры. Гидродинамические неустойчивости, индуцированные лазерным излучением на поверхности твердых тел, и их диагностика методами лазерной и зондовой микроскопии	308
Введение	308
Глава 6. Основные методы лазерной диагностики лазерно-индуцированных неоднородных структур в ванне расплава на поверхности твердого тела	311
6.1. Методы диагностики лазерно-индуцированных процессов	312
6.2. Лазерная диагностика поверхности твердого тела, облучаемой мощным лазерным излучением, при помощи усилителя яркости оптических изображений	316
6.3. Экспериментальная схема и методика измерений	318
6.4. Гидродинамика формирования микроструктур при лазерном воздействии на вещество.....	326
6.4.1. Гидродинамические процессы в ванне расплава	326
6.4.2. Математическая модель термокапиллярной конвекции.....	327
6.4.3. Математическое моделирование динамических процессов при образовании структур и неустойчивостей на поверхности твердого тела при расплаве вещества.....	331
6.4.4. Экспериментальные результаты	335
6.5. Лазерный синтез углеродных наноструктур на поверхности твердого тела	340

6.5.1. Экспериментальная методика	341
6.5.2. Образование микро- и наноструктур на поверхности стеклоуглерода при лазерном воздействии	345
6.5.3. Особенности структуры поверхности углеродосодержащих материалов после кристаллизации расплава вещества при воздействии лазерным импульсно-периодическим излучением	358
Глава 7. Плавление графита при лазерном воздействии на его поверхность и диагностика динамических процессов в реальном масштабе времени в атмосферном воздухе	364
7.1. Методика эксперимента	364
7.2. Экспериментальные результаты и их обсуждение	365
7.3. Процедура восстановления трехмерного рельефа поверхности по ее двумерным изображениям	368
7.4. Плавление углерода при лазерном нагреве образца в атмосферном воздухе	376
7.5. Исследование поверхности образцов после лазерного воздействия	379
7.5.1. Комбинационные спектры образцов после лазерного воздействия	380
7.5.2. Контроль состояния нагреваемой лазерным излучением поверхности графита с помощью лазерного монитора и оптического микроскопа	382
Глава 8. Формирование углеродных субмикронных структур и наноструктур на поверхности холодной подложки при воздействии лазерного излучения на углеродосодержащие материалы в атмосферном воздухе	387
8.1. Тепловая и гидродинамическая модели лазерной абляции	387
8.2. Экспериментальная методика	391
8.3. Наблюдение динамики процесса лазерной абляции и осаждения частиц на подложку в реальном масштабе времени при помощи лазерного монитора	394
8.4. Исследование области осаждения аблированных частиц на подложке при помощи сканирующего зондового микроскопа	395
8.5. Формирование субмикронных структур и наноструктур в слоистой углеродосодержащей системе подложка из кварцевого стекла-металл	397
8.6. Результаты экспериментов	400
8.7. Формирование наноструктур на поверхности холодной подложки при воздействии импульсно-периодического излучения с наносекундной длительностью импульсов	401
8.8. Экспериментальное сопоставление процессов лазерной абляции твердых мишеней в воде и воздухе при пикосекундной длительности импульсов	405



8.9. Осаждение частиц из плазменного эрозийного факела управляемым геометрическим макрораспределением.....	407
8.10. Характеристики формирующихся наноструктур на поверхности холодной подложки при воздействии непрерывного лазерного излучения.....	408
Глава 9. Нелинейная динамика поверхностных колебаний жидкости, возбуждаемых лазерным излучением. Фрактальные свойства поверхности.....	412
9.1. Гидродинамические неустойчивости.....	412
9.2. Пространственные характеристики оптического изображения области лазерного воздействия на поверхность вещества.....	416
9.3. Распределение энергии по пространственным частотам для гидродинамического процесса в области лазерного воздействия.....	419
9.4. Количественные характеристики оптических изображений области лазерного воздействия.....	420
9.5. Формирование волновых структур на поверхности расплава при импульсно-периодичном лазерном воздействии.....	425
9.6. Нелинейная динамика поверхностных колебаний жидкости, возбуждаемых лазерным излучением. Фазовые портреты колебаний.....	426
9.7. Временные характеристики гидродинамических неустойчивостей, индуцированных мощным лазерным излучением. Восстановление фазового портрета.....	429
Выводы.....	439
Тестовые вопросы и задания.....	441
Список литературы.....	444

Часть IV. Гибридные лазерные методы получения и осаждения наноструктур композитного состава с управляемой морфологией на поверхности твердых тел; моделирование динамических процессов.....

Введение.....457

Глава 10. Формирование микро- и наноструктурированных углеродных поверхностей на прозрачной подложке за счет использования газодинамического канала, по которому происходит транспортировка испаренного вещества при лазерном воздействии.....	459
10.1. Методика эксперимента.....	459
10.2. Исследование процессов формирования протяженных массивов наноструктур в процессе возбуждения плазмы при воздействии непрерывного лазерного излучения.....	461
10.3. Исследование процессов формирования пленок на поверхности холодной подложки при воздействии на образцы импульсно-периодического лазерного излучения с миллисекундной длительностью импульсов.....	461

10.4. Исследование процессов формирования пленок на поверхности подложки при воздействии на образцы импульсно-периодического лазерного излучения с наносекундной длительностью импульсов	465
10.5. Исследование процессов формирования пленок на поверхности подложки при воздействии на образцы импульсно-периодического лазерного излучения с фемтосекундной длительностью импульсов.....	467
10.6. Моделирование распространения испаренного вещества в канале, образованном мишенью и подложкой.....	470
10.7. Управляемый метод осаждения частиц из лазерного плазменного эрозионного факела в твердотельной структуре со сложным/ периодическим рельефом.....	473
Глава 11. Лазерный синтез углеродных нановолокон и нанокластеров в схемах с внешними электрическими и магнитными полями	477
11.1. Лазерный синтез наноструктур в присутствии постоянного электрического поля.....	477
11.2. Воздействие лазерного излучения на углеродные образцы в присутствии неоднородного магнитного поля	481
11.3. Исследование структурных свойств осаждения с применением методов фрактальной геометрии	484
11.4. Исследование осажденного слоя методами КР-спектроскопии.....	485
11.5. Моделирование процесса образования нановолокон.....	486
Глава 12. Создание наноструктурированных композиционных металлоуглеродных материалов при управляемом лазерном воздействии на порошковые системы из углеродных нанотрубок и наночастиц металлов.....	488
12.1. Описание эксперимента.....	488
12.2. Формирование металлоуглеродных соединений в процессе лазерного воздействия	490
12.2.1. Изучение поверхности мишени после воздействия лазерного излучения.....	490
12.2.2. Исследование поверхности холодной подложки после воздействия лазерного излучения	492
12.3. Исследование структуры осажденного слоя на основе подходов фрактальной геометрии	494
Глава 13. Лазерные методы получения из металлов и оксидов коллоидных систем и осаждение их на поверхность твердых тел	495
13.1. Получение коллоидных систем при лазерной абляции металлов в жидкости	496
13.2. Условия и результаты эксперимента.....	592
13.3. Обсуждение. Моделирование процессов лазерной абляции в жидкости	500

13.4. Формирование на подложке наноструктурированного слоя из полученного коллоидного раствора.....	503
Глава 14. Формирование системы микрократеров на поверхности стеклоглерода и титана при воздействии фемтосекундным лазерным излучением в условиях быстрого охлаждения в жидком азоте.....	505
14.1. Условия эксперимента для стеклоглерода.....	506
14.2. Результаты эксперимента для стеклоглерода и обсуждение	508
14.3. Методика эксперимента для титана.....	512
14.4. Результаты и обсуждение для титана	513
Глава 15. Наноструктуры с составом из благородных металлов: жидкостные и тонкопленочные системы.....	516
15.1. Гидродинамические процессы в области лазерного воздействия в условиях формирования «квантового пузыря». Наблюдение в реальном масштабе времени	517
15.2. Оптические спектры поглощения в условиях лазерного индуцирования тепловых процессов.....	522
15.2.1. Оценки для лазерного нагрева наночастиц в коллоидной системе.....	524
15.2.2. Остывание наночастиц в коллоидной системе.....	525
15.3. Оптические свойства наноструктурированных золотосеребряных пленок, полученных с помощью осаждения малых капель коллоидов	526
15.3.1. Приготовление пленок.....	527
15.3.2. Измерение оптических свойств	529
15.3.3. Моделирование оптических свойств.....	531
Выводы	532
Тестовые вопросы и задания	534
Список литературы.....	534
Часть V. Компьютерное моделирование элементов оптоэлектронных систем и фотоники на микро- и нанорурне	543
Введение	543
Глава 16. Наносистемы в микроэлектронике	544
16.1. Современное состояние микроэлектроники.....	544
16.2. Нанотехнологии в наноэлектронике.....	546
16.3. Методы и технологии получения гетероструктур.....	550
16.4. Использование органических соединений для радиосистем.....	557
Глава 17. Компьютерные технологии в наноструктурном анализе.....	562
17.1 Общие сведения.....	562
17.2. Методы моделирования роста наноструктур.....	564

17.3. Метод дискретного моделирования разбиений и упаковок	570
17.4. Основные понятия теории роста квантовых точек	574
17.5. Комплекс программ «Компьютерный наноскоп».....	575
Глава 18. Проектирование радиотехнических наноэлементов и наносистем	580
18.1. Квантовые точки для нанотехнологий	580
18.2. Проектирование неперiodических сверхрешеток	586
18.3. Моделирование полупроводниковых органических структур.....	592
18.4. Электродинамическое моделирование фрактальных антенных систем	595
18.5. Исследование и компьютерное моделирование перспективных материалов для радиосистем на наноуровне.....	606
18.6. Существующие проблемы и перспективы их решения.....	612
Выводы.....	614
Тестовые вопросы и задания.....	615
Список литературы.....	618
Часть VI. Метрологическое обеспечение наноизмерений.	
Базовые принципы	623
Введение	623
Глава 19. Концепция развития нанометрологии	624
Глава 20. Техническое обеспечение нанометрологии	629
20.1. Оптическая микроскопия	629
20.2. Электронная микроскопия.....	634
20.3. Сканирующая зондовая микроскопия	646
20.4. Спектроскопия и хроматография в нанометрологии	672
20.5. Сравнительный анализ технических средств нанометрологии	680
Глава 21. Поверка и калибровка в сфере нанометрологии.....	691
21.1. Общие положения	691
21.2. Поверка и калибровка рельефной меры	695
21.3. Поверка и калибровка растровых микроскопов	703
21.4. Поверка и калибровка атомно-силовых микроскопов	707
21.5. Организационные основы нанометрологии	713
Выводы.....	721
Тестовые вопросы и задания.....	722
Список литературы.....	723
Приложение.....	724
Заключение.....	735
Об авторах	741
Summary.....	742