

С.О.Саидов

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*(Учебное пособие для студентов и преподавателей
профильных вузов)*

издательство «КАМОЛОТ»
Бухара-2023

УДК: 621.373.8(075)

ББК: 32.843

C11 с. л.

С.О.Саидов, Основы физики лазеров и лазерных технологий [текст]: учебник / - БУХАРА: ООО “БУХОРО ДЕТЕРМИНАНТИ” издательство КАМОЛОТ, 2023 г. 360 ст

Физика лазеров и лазерных технологий является прекрасным примером неразрывной связи между наукой и практикой. В учебном пособии изложены основы физики лазеров и лазерных технологий, история развития лазерной физики, применения, перспективы развития физики лазеров и лазерной техники, а также возможности их практического применения. Учебное пособие предназначено для студентов и преподавателей профильных вузов по направлению «Физика».

Lazerlar fizikasi va lazer texnologiyalari fan va amaliyot o'rtasidagi uzviy bog'liqlikning ajoyib namunasidir. O'quv qo'llanmada lazerlar fizikasi va lazer texnologiyalari asoslari, lazer fizikasining rivojlanish tarixi, qo'llanilishi, lazer fizikasi va lazer texnologiyalarining rivojlanish istiqbollari hamda ularni amaliy qo'llash imkoniyatlari bayon etilgan. O'quv qo'llanma ixtisoslashgan olyi ta'lim muassasalarining “Fizika” ta'lim yo'nalishi talabalari va o'qituvchilari uchun mo'ljallangan.

The physics of lasers and laser technology is an excellent example of the inextricable link between science and practice. The textbook outlines the basics of laser physics and laser technology, the history of the development of laser physics, applications, prospects for the development of laser physics and laser technology, as well as the possibility of their practical application. The textbook is intended for students and teachers of specialized universities in the direction of "Physics".

ISBN: 978-9943-9553-3-2

**Рекомендовано к печати Министерством высшего образования,
науки и инноваций Республики Узбекистан в качестве учебного
пособия для студентов и преподавателей профильных вузов
(приказ № 68 от. 27 марта 2023 г.)**



© издательство «КАМОЛОТ»
© С.О.Саидов

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	8
ИСТОРИЯ И ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ ЛАЗЕРОВ.	
ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЙНШТЕЙНА, ФАБРИКАНТА, БАСОВА,	
ПРОХОРОВА, ТАУНСА И МЕЙМАНА	12
ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ЛАЗЕРОВ	15
1.ГЛАВА ЛАЗЕРЫ: ПРИНЦИП РАБОТЫ, ВИДЫ И	
ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВЕЩЕСТВО.....	19
ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЛАЗЕРОВ	20
СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. КОЭФФИЦИЕНТЫ	
ЭЙНШТЕЙНА. СТАТИСТИКА БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНА И ФЕРМИ-	
ДИРАКА И ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ	22
СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.	
КОЭФФИЦИЕНТЫ ЭЙНШТЕЙНА.....	23
ФАЗОВОЕ ПРОСТРАНСТВО. ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ...	26
СТАТИСТИКА БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНА И ФЕРМИ-ДИРАКА	27
ПОГЛОЩЕНИЕ И УСИЛЕНИЕ СВЕТА В АКТИВНОЙ СРЕДЕ.	
УСЛОВИЕ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАЗЕРОВ. ЛАЗЕРЫ С ТРЕМЯ	
И ЧЕТЫРЬМЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ (УРОВНЯМИ)	
СОСТОЯНИЯМИ	29
ТРЁХСТУПЕНЧАТАЯ ФОТОИОНИЗАЦИЯ В СИЛЬНОМ	
ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ	29
МОДЕЛЬ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ.....	34
МОДЕЛЬ ТРЁХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ	40
ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ДЛЯ ТРЁХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ	
(аналитические решения)	45
РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ: ОБЫЧНЫЙ РЕЖИМ И РЕЖИМ	
ГИГАНТСКИХ ИМПУЛЬСОВ. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ МОД	
ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА. ПОПЕРЕЧНЫЙ И ПРОДОЛЬНЫЙ	
РЕЖИМЫ	48
ТИПЫ РЕЗОНАТОРОВ. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ.	
ОПТИЧЕСКИЕ (СВЕТОВЫЕ) ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ.	
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ. ГАЗОВЫЕ И	
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ. ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ.	
ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ (ЖИДКОСТНЫЕ). ЭКСИМЕРНЫЕ	

ЛАЗЕРЫ. ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ.	
РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛАЗЕРЫ	53
ТИПЫ ЛАЗЕРОВ	57
ДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО.	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С	
НЕПРОЗРАЧНЫМИ ТВЁРДЫМИ ТЕЛАМИ	76
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С	
ВЕЩЕСТВОМ.....	76
ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И	
ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ.....	81
ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРА С ТВЁРДЫМИ ТЕЛАМИ	83
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	86
ЗАДАЧИ И ЗАДАНИЯ для практических занятий и	
самостоятельной работы	88
2. ГЛАВА ОСНОВЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ.....	91
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИНЦИПОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	
ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. УРАВНЕНИЯ	
МАКСВЕЛЛА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЫ.....	92
ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД.	
ПОНЯТИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ТЕНЗОРА ПОЛЯРИЗАЦИИ.	
ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ	
ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА МАЛОЙ И БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ	
.....	99
ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК. ВТОРАЯ ГАРМОНИКА. ФАЗОВЫЙ	
(ВОЛНОВОЙ) СИНХРОНИЗМ. ДЛИНА КОГЕРЕНТНОСТИ.	
УСИЛЕНИЕ ГАРМОНИК В ПРОСТРАНСТВЕ	109
ПОНЯТИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ФИЗИКЕ.	
ГЕНЕРАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СВЕТА	113
РАЗДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ СВЕТА И ГЕНЕРАЦИЯ СВЕТА	
ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ.	114
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ.....	114
СИНХРОНИЗАЦИЯ МОДЫ И ГЕНЕРАЦИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ	
ИМПУЛЬСОВ. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ	
ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ	117
ВРЕМЕННОЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ	
ИМПУЛЬСОВ В ЛАЗЕРЕ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД.....	120

ПОНЯТИЕ О ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСАХ. ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК	122
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	125
ЗАДАЧИ И ЗАДАНИЯ для практических занятий и самостоятельной работы.....	127
3. ГЛАВА ВЫНУЖДЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	128
РЭЛЛЕЕВСКОЕ И КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА	130
ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ.	
РАССЕЯНИЕ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА. ОБЪЯСНЕНИЕ ГОЛУБОГО ЦВЕТА НЕБА В РАМКАХ ТЕОРИИ РЭЛЕЯ.....	135
ВИДЫ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ.....	137
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МНОГОФОТОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....	146
ДВУХФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В СЛАБОПОГЛАЩАЮЩИХ СРЕДАХ. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ. ЧЕТЫРЕХФОТОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	156
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ «ИСКРЫ» И ЛАВИННОГО РАСПАДА В ПРОЗРАЧНЫХ СРЕДАХ (ДИЭЛЕКТРИКАХ).....	163
ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ И ТЕРМОЯДЕРНАЯ ПЛАЗМА. СЖАТИЕ ПЛАЗМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	169
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	180
4. ГЛАВА ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	181
ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ.	
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВАХ ПРИ ЛАЗЕРНОМ УПРОЧНЕНИИ	184
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Fe - С ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ	195
ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ СПЛАВОВ И ОБЛАСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ	198
СЕЛЕКТИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОРОШКОВ.	
ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВ	212
ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО	

ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА.....	222
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	225
5. ГЛАВА ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ .	226
КЛАССИФИКАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	186
КЛАССИФИКАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	186
ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ. ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ.....	187
ГЕТТЕРИРОВАНИЕ	191
ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ.	
ОКИСЛЕНИЕ.....	193
ЛАЗЕРНЫЙ ОТЖИГ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПОСЛЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ.....	195
ЛАЗЕРНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ.....	200
СОЗДАНИЕ СИЛИЦИДОВ.....	207
ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК.....	211
ЛАЗЕРНОЕ НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ВТСП- ПЛЕНОК.....	220
ЗАВЕРЩАЮЩИЕ ОПЕРАЦИИ. ЛАЗЕРНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ.....	222
МАРКИРОВКА.....	223
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В СОЗДАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ. ПАЙКА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ.....	224
6. ГЛАВА ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ.....	276
ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ.....	279
ГОЛОГРАФИЯ	289
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В МЕДИЦИНЕ	300
ЛАЗЕРНАЯ СВЕТОВАЯ ОБРАБОТКА ОБЪЕКТОВ	304
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	306
КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫМИ ПРОЦЕССАМИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРОВ.....	312
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	315

6. ГЛАВА СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	316
ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЗБЕКИСТАНЕ	316
ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	323
ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АЗИИ, АФРИКЕ, АМЕРИКЕ, ЛАТИНСКОЙ АМЕРИКЕ И ЕВРОПЕ	330
ГЛОССАРИЙ	336
ЛИТЕРАТУРА	346

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с проводимыми социально-экономическими реформами в Узбекистане большое внимание уделяется науке и образованию. В частности, подписанные Президентом Республики Узбекистан Ш.М. Мирзиёевым Постановления ПП-2909 от 20 апреля 2017 г. «О мерах по дальнейшему развитию системы высшего образования» и ПП-5032 от 19 марта 2021 г. «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики», подняли реформы в науке и образовании на качественно новый уровень [1]. Специальные программы, направленные на обеспечение реализации вышеуказанных решений, включают развитие материально-технической базы высших учебных заведений страны, повышение качества преподавательского состава, повышение эффективности преподавания физики, внедрение современных методов обучения, подбор одарённых студентов и определён ряд актуальных задач, направленных на подготовку конкурентоспособных специалистов для рынка труда, развитие научных исследований и инноваций, а также практическую эффективность этих задач. В связи с этим разработка и реализация практических мер по комплексной поддержке фундаментальных научных исследований в области физики, повышению эффективности системы подготовки научных кадров и углублению интеграции «наука – образование – производство – регион» является актуальной. Это, в свою очередь, способствует развитию фундаментальных наук.

Физика лазеров и лазерные технологии могут быть прекрасным примером взаимозависимости между наукой и практикой. Сегодня некоторые области науки и техники невозможно представить без лазеров.

Стремительное развитие производства требует создания все более точных, простых и надёжных инструментов. Было бы неправильно говорить, что лазерная техника не может удовлетворить такие требования. Мы постараемся доказать эти моменты. На самом деле лазеры и лазерные технологии успешно