

М О Н О Г Р А Ф И И Н Г Т У

**А. К. КОМАРОВ, К. П. КОМАРОВ
А. К. ДМИТРИЕВ**

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
ФОРМИРОВАНИЯ
И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ
В ЛАЗЕРАХ С ПАССИВНОЙ
СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД**



**А. К. КОМАРОВ, К. П. КОМАРОВ,
А. К. ДМИТРИЕВ**

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
ФОРМИРОВАНИЯ
И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ
В ЛАЗЕРАХ С ПАССИВНОЙ
СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД**



**НОВОСИБИРСК
2 0 1 7**

УДК 535.33:621.373.826

К 63

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук *И.И. Корель*
д-р физ.-мат. наук, доцент *С.М. Кобцев*

Комаров А.К.

К 63 **Нелинейная динамика формирования и взаимодействия ультракоротких импульсов в лазерах с пассивной синхронизацией мод / А.К. Комаров, К.П. Комаров, А.К. Дмитриев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 288 с. (Серия «Монографии НГТУ»).**

ISBN 978-5-7782-3339-3

Монография посвящена анализу формирования и взаимодействия ультракоротких импульсов в лазерах с пассивной синхронизацией мод и выявлению общих закономерностей в смене режимов генерации, вызванных этим взаимодействием. Исследуются механизмы квантования лазерного излучения на отдельные диссипативные солитоны, мультигистерезисные зависимости числа внутррезонаторных идентичных солитонов от накачки и других параметров лазерной системы, механизмы возникновения пороговой зависимости самостарта пассивной синхронизации лазерных мод от интенсивности начальных импульсов, режимы связанных солитонов. Анализируются возможности управления взаимодействием ультракоротких импульсов при многоимпульсной генерации через изменение нелинейно-дисперсионных параметров лазерной системы и управления таким образом режимами пассивной синхронизации лазерных мод.

Книга предназначена для специалистов в области квантовой электроники и лазерной физики, аспирантов и студентов вузов.

УДК 535.33:621.373.826

ISBN 978-5-7782-3339-3

© Комаров А.К., Комаров К.П.,
Дмитриев А.К., 2017

© Новосибирский государственный
технический университет, 2017

**A.K. KOMAROV, K.P. KOMAROV,
A.K. DMITRIEV**

**NONLINEAR DYNAMICS
OF FORMATION AND INTERACTION
OF ULTRASHORT PULSES
IN PASSIVELY MODE-LOCKED LASERS**



**NOVOSIBIRSK
2 0 1 7**

УДК 535.33:621.373.826
K 63

Reviewers:

Candidate of Physical and Mathematical Sciences *I.I. Korel*

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor *S.M. Kobtsev*

Komarov A.K.

K 63 Nonlinear dynamics of formation and interaction of ultrashort pulses in passively mode-locked lasers : monograph / A.K. Komarov, K.P. Komarov, A.K. Dmitriev. – Novosibirsk: NSTU Publisher, 2017. – 288 p. (the «NSTU Monographs» series).

ISBN 978-5-7782-3339-3

The monograph is devoted to an analysis of formation and interaction of ultrashort pulses in passively mode-locked lasers and to an identification of general regularities in the change in the lasing regimes caused by this interaction. We investigate the mechanism of quantization of laser radiation into individual dissipative solitons, multihysteresis dependences of the number of intracavity identical solitons on pumping and on other parameters of the laser system, mechanisms for the appearance of the threshold dependence of the self-start of passive mode locking on the intensity of initial pulses, and the regimes of bound solitons. The possibilities of control of the ultrashort pulse interaction under multi-pulse generation through a change in the non-linear-dispersion parameters of a laser system for the purpose of controlling of generation regimes are analyzed.

The book is intended for specialists in the field of quantum electronics and laser physics, post-graduate students and university students.

УДК 535.33:621.373.826

ISBN 978-5-7782-3339-3

© Komarov A.K., Komarov K.P.,
Dmitriev A.K., 2017
© Novosibirsk State
Technical University, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	7
Список обозначений.....	9
Введение.....	13
Область приложений генераторов ультракоротких импульсов света.....	13
Прогресс в совершенствовании генераторов световых импульсов.....	15
Задачи динамики генерации лазеров с пассивной синхронизацией мод.....	20
Краткое содержание монографии.....	29
Глава 1. Модель лазера с комплексной квадратичной дисперсией и кубической нелинейностью внутрирезонаторной среды.....	37
1.1. Основные уравнения и приближения для описания пассивной синхронизации лазерных мод.....	38
1.1.1. Линейная часть задачи.....	38
1.1.2. Нелинейные внутрирезонаторные элементы.....	45
1.2. Режим одиночного стационарного импульса.....	50
1.3. Устойчивость стационарного импульса и устанавливающиеся режимы генерации.....	56
1.3.1. Некоторые свойства устойчивого стационарного импульса.....	56
1.3.2. Результаты численного моделирования.....	58
1.3.3. Аналитическое рассмотрение задачи о конкуренции равновесных импульсов.....	60
1.4. Спектральный профиль ультракороткого импульса.....	63
1.5. Стабилизация пассивной синхронизации лазерных мод электро- оптической отрицательной обратной связью.....	66
Глава 2. Модели лазерной генерации, учитывающие частотную дисперсию и нелинейность высоких порядков.....	69
2.1. Лазеры с нелинейностью насыщающихся потерь, уменьшаю- щейся с ростом интенсивности излучения.....	69
2.1.1. Многоимпульсность, мультстабильность и гистерезис- ные явления при пассивной синхронизации лазерных мод.....	69
2.1.2. Аналитические результаты и сопоставление с экспериментом.....	76



2.2. Пассивная синхронизация лазерных мод при ограничении спектральной ширины генерируемого излучения.....	81
2.2.1. Результаты численного моделирования и аналитических расчетов.....	82
2.2.2. Механизм многоимпульсной генерации	87
2.3. Фазомодуляционная бистабильность и пороговый самостарт пассивной синхронизации лазерных мод при паразитных частотно-зависимых потерях.....	90
2.3.1. Конкуренция фазомодулированных импульсов в условиях паразитных частотно-зависимых потерь.....	90
2.3.2. Анализ динамики генерации на основе модифицированного комплексного кубического генерационного уравнения.....	93
2.3.3. Модельное уравнение и конкуренция фазомодулированных импульсов	96
2.3.4. Генерационная бистабильность титан-сапфирового лазера с керровской линзой.....	100
2.4. Пороговый самостарт пассивной синхронизации мод при частотной дисперсии показателя преломления высоких порядков	101
2.4.1. Уравнения лазерной генерации	102
2.4.2. Результаты аналитических расчетов и численного моделирования	103
2.4.3. Механизм генерационной бистабильности.....	108
2.5. Особенности пассивной синхронизации лазерных мод при нелинейности показателя преломления, уменьшающейся с ростом интенсивности	110

Глава 3. Волоконные лазеры с нелинейными потерями, связанными с нелинейным вращением поляризации излучения 113

3.1. Выбор модели и генерационные уравнения	118
3.1.1. Основные принципы модели.....	118
3.1.2. Нелинейное поляризационное вращение и фазовые пластины	120
3.1.3. Нелинейные потери при различных пространственных ориентациях фазовых пластин	122
3.1.4. Дисперсия и усиление	124
3.1.5. Уравнения в безразмерных переменных и процедура счета	125
3.1.6. Переход к комплексному генерационному уравнению третьей-пятой степени с насыщающимся усилением	128



3.1.7. Поляризационная эволюция световой волны в волокне с двойным лучепреломлением и керровской нелинейностью.....	130
3.2. Результаты численного моделирования пассивной синхронизации лазерных мод	137
3.2.1. Эффект нелинейной обратной связи.....	138
3.2.2. Бистабильная генерация: пассивная синхронизация лазерных мод и режим непрерывной генерации	141
3.2.3. Мультистабильность и гистерезисные явления при многоимпульсной пассивной синхронизации мод волоконных лазеров.....	142
3.2.4. Качественная интерпретация мультистабильности и мультигистерезисной зависимости от накачки	145
3.3. Пичковая генерация и режимы пассивной синхронизации мод	148
3.3.1. Учет конечного времени релаксации усиливающей среды.....	148
3.3.2. Результаты численного моделирования	149
3.4. Пассивная синхронизация мод волоконных лазеров при удвоении периода повторения ультракоротких импульсов в выходном излучении	153
3.5. Структурные солитоны.....	162
3.5.1. Численное моделирование.....	163
3.5.2. Формирование солитонного пьедестала.....	169
Глава 4. Режимы связанных солитонов	173
4.1. Квантование энергии связи взаимодействующих солитонов.....	175
4.1.1. Стационарные состояния двух связанных импульсов	175
4.1.2. Информационные последовательности связанных солитонов.....	179
4.1.3. Асимметричные стационарные состояния пары связанных солитонов	181
4.1.4. Физическая интерпретация квантования энергии связи взаимодействующих импульсов	182
4.1.5. Сравнение теоретических результатов с экспериментом	186
4.2. Гармоническая пассивная синхронизация мод со сверхвысокой частотой следования световых импульсов на основе связанных солитонов	188
4.3. Формирование мощных солитонных крыльев за счет дисперсионных волн.....	192
4.3.1. Модель лазерной генерации	193
4.3.2. Численное моделирование.....	194



Глава 5. Управление взаимодействием световых импульсов в лазерных системах	197
5.1. Спектральное управление взаимодействием ультракоротких импульсов в волоконных лазерах	197
5.1.1. Генерационные уравнения.....	197
5.1.2. Результаты численного моделирования.	199
5.1.3. Механизмы взаимодействия солитонов :	207
5.2. Механизмы управления взаимодействием ультракоротких импульсов через модуляцию усиления-потерь и показателя преломления.....	211
5.2.1. Уравнения генерации	212
5.2.2. Упорядочение импульсов через дополнительную активную модуляцию потерь и показателя преломления.....	212
5.2.3. Пассивная модуляция: притяжение и расталкивание импульсов.....	215
5.2.4. Аналитическое решение с учетом инерционных нелинейностей	218
5.2.5. Оценка времени переходного процесса в случае активной модуляции потерь и показателя преломления	224
5.3. Гармоническая пассивная модовая синхронизация структур связанных солитонов в волоконных лазерах	225
5.3.1. Вводная часть.....	225
5.3.2. Генерационные уравнения.....	226
5.3.3. Численное моделирование.....	228
5.4. Управление режимами пассивной синхронизации мод за счет инжекции внешнего монохроматического излучения	233
5.4.1. Модель равномерно распределенной внутрирезонаторной среды	234
5.4.2. Лазер с техникой нелинейного поляризационного вращения	237
5.5. Подавление многоимпульсности для увеличения энергии генерируемых импульсов.....	243
5.5.1. Модель лазерной генерации	243
5.5.2. Результаты численного моделирования	244
5.6. Гибридизация пассивной синхронизации мод и режима незатухающих пиков излучения волоконных лазеров.....	251
Заключение.....	255
Библиографический список	258

CONTENTS

Foreword.....	7
List of symbols.....	9
Introduction.....	13
Application area of generators of ultrashort light pulses.....	13
Progress in the improvement of light pulse generators	15
Problems of the generation dynamics of passively mode-locked lasers.	20
Short contents of the monography.	29
Chapter 1. Model of a laser with complex quadratic dispersion and cubic nonlinearity of an intracavity medium.....	37
1.1. Basic equations and approximations for description of the laser passive mode locking	38
1.1.1. Linear part of the task.....	38
1.1.2. Nonlinear intracavity elements.....	45
1.2. Regime of a single stationary pulse.....	50
1.3. Stability of the stationary pulse and the established regimes of generation.....	56
1.3.1. Some properties of a stable stationary pulse.....	56
1.3.2. Results of numerical simulation	58
1.3.3. Analytical consideration of the problem of the competition of equilibrium pulses	60
1.4. Spectral profile of the ultrashort pulse	63
1.5. Stabilization of passive laser-mode locking by electro-optical negative feedback.....	66
Chapter 2. Laser-generation models taking into account frequency dispersion and nonlinearity of high orders	69
2.1. Lasers with a saturable-loss nonlinearity decreasing with increasing radiation intensity	69
2.1.1. Multipulse operation, multistability and hysteresis phenomena under passive locking of laser modes	69
2.1.2. Analytical results and comparison with experiment.....	76

2.2. Passive locking of laser modes under limitation of spectral width of generated radiation	81
2.2.1. Results of numerical simulation and analytical calculations	82
2.2.2. Mechanism of multipulse operation	87
2.3. Phase-modulation bistability and threshold self-start of passive locking of laser modes under parasitic frequency-dependent losses	90
2.3.1. Competition of phase-modulated pulses under parasitic frequency-dependent losses	90
2.3.2. Analysis of the lasing dynamics on the basis of a modified complex cubic generation equation	93
2.3.3. Model equation and competition of phase-modulated pulses	96
2.3.4. Generational bistability of a titanium-sapphire laser with a Kerr lens	100
2.4. Threshold self-start of passive mode locking under the high-order frequency dispersion of a refractive index	101
2.4.1. Equations of laser generation	102
2.4.2. Results of analytical calculations and numerical modeling	103
2.4.3. Mechanism of generation bistability	108
2.5. Features of passive locking of laser modes under the refractive index nonlinearity decreasing with increasing intensity	110
Chapter 3. Fiber lasers with nonlinear losses due to nonlinear rotation of radiation polarization	113
3.1. Choice of a model and the generation equations	118
3.1.1. Basic principles of the model	118
3.1.2. Nonlinear polarization rotation and phase plates	120
3.1.3. Nonlinear losses at various spatial orientations of phase plates	122
3.1.4. Dispersion and amplification	124
3.1.5. Equations for dimensionless variables and the procedure of counting	125
3.1.6. Transition to the cubic-quintic generation equation with saturable gain	128
3.1.7. Polarization evolution of a light wave in a fiber with birefringence and Kerr nonlinearity	130
3.2. Results of numerical modeling of passive locking of laser modes	137
3.2.1. Effect of nonlinear feedback	138
3.2.2. Bistable generation: passive laser mode locking and continuous wave	141
3.2.3. Multistability and hysteresis phenomena in the case of multipulse passive mode locking of fiber lasers	142
3.2.4. Qualitative interpretation of multistability and multi-hysteresis dependence on pumping	145



3.3. Spike generation and regimes of passive mode locking.....	148
3.3.1. Consideration of the finite relaxation time of the gain medium	148
3.3.2. Results of numerical simulation	149
3.4. Passive mode locking of fiber lasers under doubling the repetition period of ultrashort pulses in the output radiation.....	153
3.5. Structural solitons.....	162
3.5.1. Numerical simulation	163
3.5.2. Formation of a soliton pedestal	169
Chapter 4. Regimes of bound solitons	173
4.1. Quantization of the binding energy of interacting solitons	175
4.1.1. Stationary states of two bound pulses.....	175
4.1.2. Information sequences of bound solitons	179
4.1.3. Asymmetric stationary states of a pair of bound solitons.....	181
4.1.4. Physical interpretation of the quantization of the binding energy of interacting pulses.....	182
4.1.5. Comparison of theoretical results with experiment	186
4.2. Harmonic passive mode locking with ultrahigh pulse repetition rate based on bound solitons	188
4.3. Formation of powerful soliton wings due to dispersion waves	192
4.3.1. Model of laser generation.....	193
4.3.2. Numerical simulation	194
Chapter 5. Control of the interaction of light pulses in laser systems	197
5.1. Spectral control of the interaction of ultrashort pulses in fiber lasers	197
5.1.1. Generation equations	197
5.1.2. Results of numerical simulation	199
5.1.3. Mechanisms of interaction of solitons.....	207
5.2. Mechanisms for control of the interaction between pulses through modulation of gain-loss and refractive index	211
5.2.1. Equations of generation.....	212
5.2.2. Arrangement of pulses through additional active modulation of losses and the refractive index.....	212
5.2.3. Passive modulation: attraction and repulsion of pulses	215
5.2.4. Analytical solution takings into account inertial nonlinearities.....	218
5.2.5. Estimate of the time of the transient process in the case of active modulation of losses and the refractive index.....	224
5.3. Harmonic passive mode locking of bound soliton structures in fiber lasers.....	225
5.3.1. Introduction	225
5.3.2. Generation equations	226
5.3.3. Numerical simulation	228



5.4. Control of regimes of passive mode locking through injection of external monochromatic radiation.....	233
5.4.1. Model of a uniformly distributed intracavity medium.....	234
5.4.2. Laser with the technique of nonlinear polarization rotation	237
5.5. Suppression of multiple pulse operation for increase of the energy of generated pulses	243
5.5.1. Model of laser generation.,	243
5.5.2. Results of numerical simulation	244
5.6. Hybridization of passive mode locking and the regime of undamped radiation spikes of fiber lasers.....	251
Conclusion	255
Bibliographic list	258