

На правах рукописи

Валеев Антон Альбертович

**Нелинейные оптические процессы с участием многих
компонент оптического поля: четырехфотонное
комбинационно-параметрическое преобразование
в молекулярных газах и генерация
в полупроводниковых лазерах**

Специальность 01.04.21-лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2005

Работа выполнена в Международном лазерном центре и на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Андреев Анатолий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Маймистов Андрей Иванович

кандидат физико-математических наук, доцент
Манцызов Борис Иванович

Ведущая организация: Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет) (МИРЭА)

Защита состоится «_____» _____ 2005 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2 Москва, Ленинские горы, МГУ, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ

Автореферат разослан «_____» _____ 2005 года

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 501.001.31, доцент

Т.М. Ильинова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В последнее время значительный интерес вызывают исследования возможности генерации субпикосекундных импульсов в процессе четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования и в полупроводниковых лазерах с насыщающимся поглотителем.

Комбинационно-параметрическое преобразование лазерной накачки молекулярной средой может сопровождаться генерацией излучения со спектром, состоящим из большого числа линий и перекрывающим широкую спектральную область в ИК, видимом и УФ-диапазоне. Подобное преобразование рассматривалось в достаточно большом количестве экспериментальных работ в качестве эффективного способа получения многочастотного излучения со спектром, состоящим из эквидистантных или квази-эквидистантных спектральных линий при колебательном и/или вращательном ВКР и резонансных параметрических процессах, в частности, в газообразном водороде.

ВКР-преобразование импульсов пико- и фемтосекундной длительности, протекающее в существенно нестационарных условиях, имеет ряд существенных особенностей. Например, возможно распространение солитонов в условиях как резонансного, так и нерезонансного ВКР. Интересной является идея использования ВКР и четырехфотонных комбинационно-параметрических процессов, наряду с фазовой самомодуляцией и генерацией гармоник высокого порядка, для получения фемто- и субфемтосекундных импульсов. Несмотря на значительное число опубликованных работ, остаются малоизученными способы получения и спектрально-временные свойства генерируемого излучения.

В работах Васильева П. П. субпикосекундная генерация была получена в трехсекционном гетеролазере на AlGaAs/GaAs с плоским резонатором. Лазер состоял из двух усиливающих секций длиной 30 мкм, а расположенная в середине резонатора секция, выполняющая функции насыщающегося поглотителя, имела длину 10 мкм. Общая длина резонатора составила 100 мкм. Через усилительные секции лазера пропускались импульсы тока амплитудой 200-450 мА с длительностью несколько наносекунд и частотой повторения 1 -10

МГц. К поглощающей секции прикладывалось напряжение обратного смещения до -7 В.

По результатам эксперимента наблюдались когерентные осцилляции оптического излучения с частотой более 1 ТГц. Длительность основного импульса составила менее 1 пс, что намного меньше времени обхода светом резонатора лазера, $3,3$ пс.

Большинство теоретических исследований динамики генерации полупроводниковых лазеров базировалось на использовании укороченных уравнений Максвелла-Блоха, т.е. модели одномодового поля излучения, взаимодействующего с системой двухуровневых атомов. Эта модель позволяет качественно исследовать зависимость параметров генерируемых импульсов от параметров среды и тока накачки. Однако детальное описание динамики процесса, позволяющее провести количественное сравнение экспериментальных данных и теоретических расчетов, требует привлечения более сложных моделей.

Цели диссертационной работы

Предметом настоящей работы является исследование генерации многих стоксовых и антистоксовых компонент в условиях четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования и исследование управления параметрами многомодовой генерации субпикосекундных импульсов в полупроводниковом инжекционном лазере. Цели работы:

1. Получить уравнения, описывающие четырехфотонное комбинационно-параметрическое преобразование и учитывающие произвольное число участвующих в преобразовании компонент. Получить уравнения, выраженные через конечное число функций, позволяющие исследовать четырехфотонное комбинационно-параметрическое преобразование в стационарном режиме и в случае распространения солитонов.
2. Получить и исследовать аналитически и численно полученные уравнения в условиях стационарного режима. Получить решение в виде солитонов четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования. Исследовать устойчивость полученного решения к малым возмущениям. Исследовать распространение солитонов в условиях частичного нарушения

условия синхронизма. Предложить способ возбуждения солитонов. Рассчитать динамику возбуждения солитонов.

3. Исследовать четырехфотонное комбинационно-параметрическое преобразование в условиях синхронизма в зависимости от коэффициент штарковского сдвига частоты, в условиях, когда на вход комбинационно активной среды, находящейся в основном состоянии, подается только импульс накачки и ничтожно малое когерентное затравочное излучение на частоте Стокса.
4. Построить модель, позволяющую описать преобразование пробных импульсов в антистоксовы и стоксовы компоненты произвольного порядка при их распространении в комбинационно активной среде с наведенной бигармонической накачкой когерентностью. Получить решения как в виде амплитуд стоксовых и антистоксовых компонент, так и в виде суммарного поля всех компонент.
5. Разработать многомодовую модель генерации трехсекционного полупроводникового лазера на примесных переходах AlGaAs/GaAs, позволяющую учесть дисперсионные свойства активной среды, линейное поглощение в резонаторе, эффекты дефазировки поляризации, межзонной и внутризонной релаксации.
6. Установить параметры, определяющие длительность импульсов генерации в полупроводниковом инжекционном лазере. Рассчитать динамику интенсивности и спектр лазера в зависимости от управляющих параметров. Определить условия, обеспечивающие генерацию субпикосекундных импульсов. Оценить длительность полученных импульсов.

Научная новизна

1. Получена система уравнений, замкнутая относительно суммарной интенсивности всех участвующих в преобразовании компонент, функции парных корреляций комплексных амплитуд поля, разности населенностей и недиагонального элемента матрицы плотности, позволившая определить условия, при которых возможна генерация многих стоксовых и антистоксовых компонент, и получить решение в виде солитонов.
2. Исследована динамика нестационарного процесса четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования бигармонической

накачки в зависимости от интенсивности основной компоненты и величины коэффициента штарковского сдвига частоты.

3. Получено решение системы уравнений четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования, позволившее описать рассеяние пробного импульса во многие стоксовые и антистоксовые компоненты на предварительно созданной в среде волне когерентности.
4. Развита теория генерации субпикосекундных импульсов в полупроводниковых инжекционных лазерах, учитывающая многомодовость генерации и зонную структуру уровней энергии в примесных полупроводниках. Исследована пространственно-временная динамика самосинхронизации мод и динамика эволюции распределения электронов по энергетическим уровням зон в трехсекционном лазере с насыщающимся поглотителем.

Практическая ценность

1. В процессе четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования возможно возникновение и распространение солитонов. Солитоны комбинационно-параметрического преобразования, содержащие множество согласованных по амплитуде и фазе компонент поля, открывают возможность получения устойчивых импульсов фемто- и субфемтосекундной длительности.
2. Полученное решение уравнений модели, позволяющей описать в плосковолновом бездисперсионном приближении преобразование пробных импульсов в антистоксовы и стоксовы компоненты произвольного порядка при их распространении в комбинационно активной среде с наведенной когерентностью, определяет рамки применимости линейного приближения величин амплитуд рожденных стоксовой и антистоксовой компонент первого порядка в зависимости от амплитуды волны когерентности и условия, необходимые для появления компонент второго и более высокого порядков.
3. Разработанная модель генерации субпикосекундных импульсов в инжекционном трехсекционном лазере позволила определить условия, оптимальные для генерации импульсов: величину тока накачки, запирающего напряжения, соотношение длин усиливающей и поглощающей секции.

Защищаемые положения

1. Стационарные процессы четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования в невозбужденной среде линейно поляризованных и сонаправленных излучения накачки и пренебрежимо малого затравочного оптического сигнала на частоте Стокса с участием компонент произвольного порядка протекают вне синхронизма и прекращаются при строгом выполнении условия синхронизма.

2. Возможно распространение нескольких компонент, рожденных в процессе четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования в виде солитонов. Солитоны устойчивы как к малым возмущениям, так и к малым значениям скорости поперечной релаксации, коэффициента штарковского сдвига частоты и отстройки от синхронизма. Согласованность фаз и амплитуд компонент солитона открывает возможность получения импульсов с длительностями, сравнимыми и меньшими, чем период оптического поля.

3. Наибольшее число стоксовых и антистоксовых компонент, рожденных в нестационарных условиях четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования, в режиме синхронизма, линейно поляризованных в одном направлении когерентных импульса накачки и пренебрежимо малого затравочного оптического сигнала на частоте Стокса, определяется значением коэффициента штарковского сдвига частоты; в отсутствие штарковского сдвига генерация стоксовых и антистоксовых компонент не наблюдается.

4. В процессе преобразования в антистоксовы и стоксовы компоненты пробных импульсов при их распространении в условиях синхронизма в комбинационно активной среде, в которой предварительно создана волна когерентности, суммарное поле всех рожденных компонент, частоты которых настолько близки друг к другу, что можно пренебречь дисперсией параметров, зависящих от частот компонент, имеет вид модулированного по фазе исходного пробного импульса, содержащего одну компоненту.

5. Введение в резонатор инжекционного полупроводникового лазера поглощающего слоя позволяет управлять параметрами генерируемых импульсов. Оптимальный подбор толщины слоя и величины запирающего тока позволяет увеличить эффективную ширину полосы усиления и, таким образом,

сократить длительность импульсов. Параметры генерируемых импульсов зависят также и от пространственного распределения коэффициента усиления. Расположение поглотителя посередине резонатора приводит к стабильной генерации цуга субпикосекундных импульсов, для реализации режима генерации одиночного субпикосекундного импульса поглощающий слой должен быть расположен ближе к торцу активной области лазера.

Апробация работы

Основные результаты работы опубликованы в 3 статьях в журнале «Квантовая электроника». Кроме того, результаты докладывались на международных конференциях: XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (Minsk, Belarus, June 26 – July 1, 2001), International Quantum Electronics Conference (Moscow, Russia, June 22-28, 2002) и семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем работы: 109 страниц, включая 67 рисунков. Библиография содержит 101 наименование, в том числе 3 авторских публикации

Личный вклад

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при его определяющем участии.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **ВВЕДЕНИИ** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель диссертационной работы, описаны структура и содержание работы.

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена моделированию стационарных процессов четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования с участием компонент произвольного порядка и сравнению полученных результатов с экспериментами и другими моделями. Предметом этой главы

является развитие модели, описывающей четырехфотонное комбинационно-параметрическое преобразование и учитывающей произвольное число участвующих в преобразовании компонент, исследование решений уравнений модели в стационарном случае, и в режиме распространения и возбуждения солитонов.

В параграфе 1.1 приведен обзор литературы, посвященной стационарным процессам четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования, в том числе рассмотрена работа Н. Бломбергера и И. Р. Шена, в которой анализируется стационарный режим генерации компонент, одной стоксовой и одной антистоксовой, в зависимости от фазового согласования взаимодействующих полей. Детальный анализ, проведенный авторами соответствующей статьи, открывает следующие особенности при вышеуказанных допущениях.

1. Интенсивность антистоксовой компоненты для направления точного синхронизма равна нулю.
2. Интенсивность антистоксовой компоненты максимальна для углового отклонения, определяемого величиной интенсивности лазерного луча и нелинейной восприимчивостью.
3. Частотный спектр антистоксовой линии имеет асимметричную форму.
4. Для больших расстройек волнового вектора наибольшее усиление имеет стоксова компонента. При этом она всегда сопровождается слабой добавкой антистоксовой компоненты. В данном случае отношение интенсивностей антистоксовой составляющей к стоксовой определяется следующим приближенным выражением:

$$I(\omega_a)/I(\omega_s) \cong \left(4\pi^2 \omega_s^4 / c^4 k_{sz}^2\right) |\chi_s|^2 |E_0|^4 / (2k_l - k_s - k_a)^2 .$$

Здесь также рассмотрены работы, посвященные генерации высших стоксовых компонент, как в приближении плоских волн (И. Р. Шен), так и в случае использования пучка накачки конечного сечения (Д. фон дер Линде, М. Майер, В. Кайзер).

В рассмотренных в этом параграфе работах остаются неисследованными последовательная стационарная генерация стоксовых и антистоксовых компонент высокого порядка, солитонное решение, а также режим, когда

$(\omega_s^2 / k_{sz})\chi_s \neq (\omega_a^2 / k_{az})\chi_a^*$. Рассмотрению вышеуказанных случаев посвящена эта глава.

В параграфе 1.2 определены объект моделирования, геометрия задачи, представление поля в виде суммы компонент. Приведены уравнения, описывающие динамику взаимодействия двухуровневой системы с оптическим полем, содержащим произвольное число компонент. Эти уравнения сведены к уравнениям, выраженным через функцию суммарной интенсивности и функцию парных корреляций комплексных амплитуд компонент поля. В частном случае солитонного распространения с определенной скоростью они принимают вид уравнений в полных производных.

На входе среды $z \in [0, L]$ моделируется оптическое поле, состоящее из двух или трех компонент, соответствующих накачке, стоксу и антистоксу. Волновой фронт рассматривается плоским, что сводит задачу к одномерной.

Напряженность суммарного поля на частоте накачки и частотах комбинационных компонент представлена в следующем виде:

$$E(t, z) = \sum_j A_j(t, z) \exp i(k_j z - \omega_j t) + \text{к.с.} \quad (1),$$

где A_j - медленно меняющиеся амплитуды, $\omega_j = \omega_0 + j \cdot \Delta\omega$, $k_j = \omega_j n_j / c$ - частоты и волновые векторы компонент, при этом частоты отделены друг от друга частотой $\Delta\omega$, близкой к частоте перехода Ω . Оптическое поле всех компонент считается линейно поляризованным в одном направлении.

Система уравнений для медленно меняющихся комплексных амплитуд электромагнитного поля имеет следующий вид:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial z} \right) A_j = i 2\pi \omega_j \eta_j n_j N \{ [r_{11}(\omega_j, -\omega_j) \rho_{11} + r_{22}(\omega_j, -\omega_j) \rho_{22}] A_j + r_{12}(\omega_j, -\omega_{j-1}) \rho_{21} A_{j-1} + r_{21}(\omega_{j+1}, -\omega_j) \rho_{12} A_{j+1} \} \quad (2)$$

где n_j , η_j - фазовый и групповой показатели преломления соответствующей частотной компоненты, не учитывающие резонансных эффектов.

Матричные элементы $r_{11}(\omega_j, -\omega_j)$, $r_{22}(\omega_j, -\omega_j)$ и $r_{21}(\omega_{j+1}, -\omega_j)$ имеют следующий вид:

$$r_{mn}(\omega_j, -\omega_j) = \frac{1}{\hbar} \sum_k d_{nk} d_{kn} \left[\frac{1}{\Omega_{kn} - \omega_j} + \frac{1}{\Omega_{kn} + \omega_j} \right],$$

$$r_{mn}(\omega_{j+1}, -\omega_j) = \frac{1}{\hbar} \sum_k d_{mk} d_{kn} \left[\frac{1}{\Omega_{km} - \omega_j} + \frac{1}{\Omega_{kn} + \omega_j} \right] \quad (3).$$

Суммирование осуществляется по всем уровням, кроме первого и второго, поскольку дипольный момент d_{21} равен нулю. Здесь и далее считается, что частоты дипольно разрешенных переходов в несколько раз превышают несущие частоты взаимодействующих гармоник. Таким образом, рассмотрение ограничено случаем нерезонансного комбинационного рассеяния.

Затем r_{11} и r_{22} представлены с помощью следующего приближения:

$$r_{11}(\omega_j, -\omega_j)\rho_{11} + r_{22}(\omega_j, -\omega_j)\rho_{22} = r_{11}(\omega_0, -\omega_0)\rho_{11} + r_{22}(\omega_0, -\omega_0)\rho_{22} - \frac{c}{2\pi\eta_j^2 n_j \omega_j N} a_2 \frac{j(j-1)}{2},$$

где a_2 – коэффициент при члене второго порядка в разложении величины волнового вектора компоненты излучения в среде по ее номеру:

$$k_j = \omega_j n_j / c = a_0 + a_1 j + a_2 j(j-1)/2 + \dots$$

Полученное приближение позволяет пренебречь, наряду с третьим и более высокими порядками дисперсии, вклад слагаемых, содержащих одновременно вклады разности населенностей и номера компоненты, значения которых малы.

В этом приближении уравнение (2) примет следующую форму:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial z} \right) A_j + i \frac{c}{\eta_j} a_2 \frac{j(j-1)}{2} A_j = i 2\pi \omega_j \eta_j n_j N \{ [r_{11}(\omega_0, -\omega_0)\rho_{11} + r_{22}(\omega_0, -\omega_0)\rho_{22}] A_j + r_{12}(\omega_j, -\omega_{j-1})\rho_{21} A_{j-1} + r_{21}(\omega_{j+1}, -\omega_j)\rho_{12} A_{j+1} \} \quad (2 \text{ б}).$$

Уравнение для статистически усредненного недиагонального элемента матрицы плотности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\gamma + i\delta + i\Delta_{21}) = -\frac{i}{\hbar} R \sum r_{21} A_j A_{j-1}^* \quad (4),$$

где

$$\Delta_{21} = \frac{1}{\hbar} \sum_j [\kappa_1(\omega_j) - \kappa_2(\omega_j)] |A_j|^2 \approx \Theta \sum_j |A_j|^2$$

характеризует штарковский сдвиг частоты (здесь и далее $\rho \equiv \rho_{21}$).

Уравнение усредненной разности населенностей между верхним и нижним уровнями имеет вид:

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \frac{R - R_S}{T_1} = -\frac{2i}{\hbar} \left[\sum_k r_{12} A_k^* A_{k-1} \rho_{21} - \text{компл. сопр.} \right] \quad (5).$$

В последних двух уравнениях учтены процессы продольной (релаксация к равновесному значению R_S разности населенностей за время T_1) и поперечной (со скоростью γ) релаксации, а также частотная расстройка $\delta = \Omega - \Delta\omega$.

Для условий синхронизма получена самосогласованная система уравнений, выраженная через функции суммарной интенсивности Y и парных корреляций Z компонент оптического поля:

$$(\partial / \partial t + u \partial / \partial z) Y = i 2 \pi N M (Z \rho - Z^* \rho^*) \quad (6),$$

$$(\partial / \partial t + u \partial / \partial z) Z = -i 2 \pi N (K Y \rho^* + O Z (1 + \mu R)) \quad (7),$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho (\gamma + i \delta + i \Theta Y) = -\frac{i r_{21}}{\hbar} R Z^* \frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{R - R_S}{T_1} - \frac{2 i r_{21}}{\hbar} (Z \rho - Z^* \rho^*) \quad (8),$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{R - R_S}{T_1} - \frac{2 i r_{21}}{\hbar} (Z \rho - Z^* \rho^*) \quad (9),$$

где

$$Y = \sum_j |A_j|^2 \quad (0.1), \quad Z = \sum_j A_j A_{j+1}^* \quad (10).$$

В частном случае солитонного распространения со скоростью v уравнения (0.6–0.9) принимают вид уравнений в полных производных:

$$(1 - u/v) \frac{dY}{dt} = (u - v) \frac{dY}{dz} = i 2 \pi N M (Z \rho - Z^* \rho^*) \quad (11)$$

$$(1 - u/v) \frac{dZ}{dt} = (u - v) \frac{dZ}{dz} = -i 2 \pi N (K Y \rho^* + O Z (1 + \mu R)) \quad (12)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho (\gamma + i \delta + i \Theta Y) = -\frac{i r_{21}}{\hbar} R Z^*, \quad \frac{d\rho}{dz} = -\frac{u}{v} \frac{d\rho}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{R - R_S}{T_1} - \frac{2 i r_{21}}{\hbar} (Z \rho - Z^* \rho^*), \quad \frac{dR}{dz} = -\frac{u}{v} \frac{dR}{dt} \quad (14)$$

В параграфе 1.3 рассмотрена последовательная стационарная генерация произвольного числа стоксовых и антистоксовых компонент. Теоретически и с помощью численного эксперимента рассмотрены два случая генерации: в условиях синхронизма и в условиях, нарушающих синхронизм. Получена система безразмерных уравнений, с помощью которой был осуществлен численный эксперимент. Введена эффективная длина комбинационно-параметрического преобразования.

В параграфе 1.4 показано существование солитонных состояний многокомпонентного поля, распространяющихся со скоростью, меньшей скорости света в среде. Численным расчетом столкновения двух солитонов показаны их устойчивость. Численным расчетом, учитывающим частичное нарушение условий синхронизма компонент солитона, поперечную релаксацию и штарковский сдвиг частоты, на примере Q-полосы D_2 продемонстрирована возможность квазистационарного распространения солитонов в условиях, по многим характеристикам приближенных к реальным. Показано, что солитоны могут быть возбуждены, если на вход среды подать оптическую волну постоянной амплитуды на частоте основной компоненты и немодулированный по фазе импульс гауссовой формы на частоте, являющейся суммой частот основной компоненты и скорректированной с учетом штарковского сдвига частоты перехода.

На рис. 1 представлены зависимости безразмерных разности населенностей R (толстая линия), суммарной интенсивности Y (тонкая линия), амплитуды функции парных корреляций $|Z|$ (пунктир) и интенсивностей отдельных компонент от безразмерной координаты для солитонных решений при $v/c=16/17$.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена моделированию нестационарных процессов четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования с участием компонент произвольного порядка и сравнению полученных результатов с экспериментальными и другими моделями.

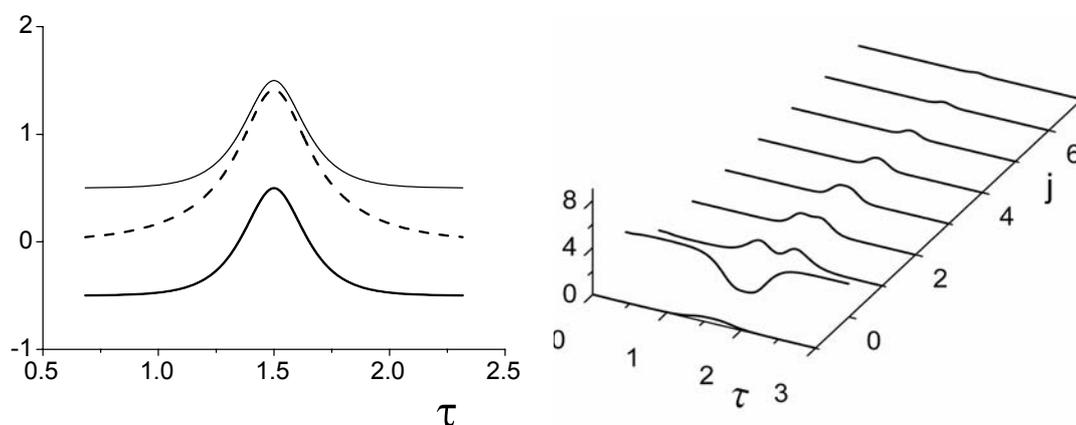


Рисунок 1. зависимости безразмерных разности населенностей R (толстая линия), суммарной интенсивности Y (тонкая линия), амплитуды функции парных корреляций $|Z|$ (пунктир) и интенсивностей отдельных компонент от безразмерной координаты для солитонных решений при $v/c=16/17$.

В **параграфе 2.1** рассмотрена работа Л. Л. Лосева и А. П. Луценко, в которой исследованы нестационарные процессы четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования с участием многих как стоксовых, так и антистоксовых компонент. Авторами предложен наиболее последовательный теоретический подход. В использованной модели рассмотрено приближение, не учитывающее дисперсии среды и штарковский сдвиг частоты.

В **параграфе 2.2** поставлены 2 задачи, предполагающие рассмотрение процессов, дополняющих модель, предложенную авторами вышеуказанной работы: четырехфотонное комбинационно-параметрическое преобразование импульса накачки на основной частоте и малого когерентного затравочного излучения на частоте Стокса, четырехфотонное комбинационно-параметрическое преобразование слабого пробного импульса на наведенной в среде с помощью бигармонической накачки волне когерентности.

В **параграфе 2.3** численным расчетом исследовано влияние штарковского сдвига частоты на эффективность четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования импульса накачки и ничтожно малого когерентного затравочного излучения на частоте Стокса. Л. Л. Лосевым и А. П. Луценко показано, что в рассматриваемых условиях при нулевом значении коэффициента штарковского сдвига частоты генерация стоксовых и антистоксовых компонент не происходит. В работе показано, что в присутствии штарковского сдвига частоты происходит генерация компонент, число которых достигает максимального значения, которое определяется коэффициентом штарковского сдвига.

В **параграфе 2.4** рассмотрена временная динамика комбинационно-параметрического преобразования в среде с наведенной вращательной когерентностью. Получено аналитическое решение уравнений четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования исходного монохроматического поля в виде амплитуд компонент и в виде модулированного по фазе исходного поля. Результаты сравнены с экспериментальными.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена моделированию многомодовой генерации субпикосекундных импульсов в трехсекционном инжекционном полупроводниковом лазере и сравнению полученных результатов с

экспериментами и другими моделями. Предметом этой главы является развитие модели генерации субпикосекундных импульсов в полупроводниковых инжекционных лазерах с целью учесть многомодовость генерации и зонную структуру уровней энергии в примесных полупроводниках. Основной целью главы является исследование пространственно-временной динамики самосинхронизации мод и динамика эволюции распределения электронов по энергетическим уровням зон в трехсекционном полупроводниковом лазере с насыщающимся поглотителем.

В параграфе 3.1 приведен обзор работ, в которых исследовалась генерация субпикосекундных импульсов в трехсекционных инжекционных полупроводниковых лазерах. Общая длина каждого исследованного лазера составляла 100 мкм. Усилительные секции лазера были длиной по 30 мкм, а

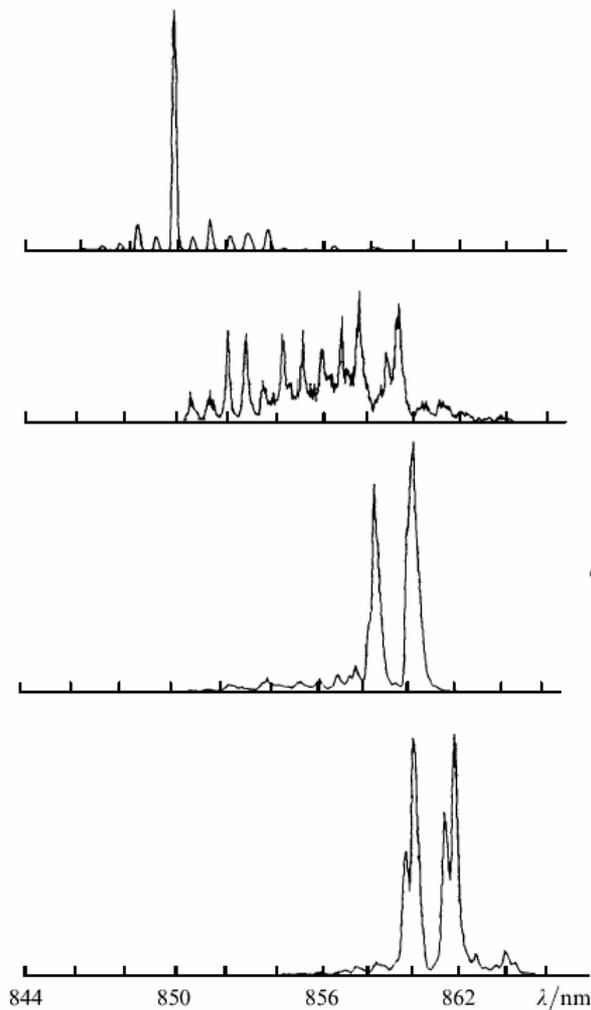


Рисунок 2. Оптические спектры излучения лазера при запирающих напряжениях на поглотителе 0 (a), -2.0 (b), -5.5 (c) и -7.0 В(d).

расположенная в середине резонатора секция, выполняющая функции насыщающегося поглотителя, имела длину 10 мкм. Лазеры работали при токах накачки 400–700 мА, что многократно превышает пороговый ток при однородной инжекции. К поглощающей секции прикладывалось напряжение обратного смещения до -7 В. Основные результаты, полученные авторами, в виде оптических спектров (рис. 2), автокорреляционных функций интенсивности (рис. 3), представлены в этом параграфе. Наиболее важными, по мнению Васильева и его коллег, являются исследования

динамики амплитуды и фазы оптического поля. Такие исследования можно провести, изучая интерферограммы. На рис. 3 представлены интерферограммы автокорреляционных функций излучения лазера при различных насыщающихся потерях в резонаторе. Видна сильная зависимость когерентности излучения и динамики амплитуды и фазы поля от потерь в резонаторе. Стоит отметить, что такого рода автокорреляция наблюдалась автором и его коллегами впервые. Характерной особенностью этих интерферограмм является наличие многочисленных пиков, обусловленных сложной, немонотонной зависимостью амплитуды и фазы поля от времени. Такой вид интерферограмм контрастирует с типичными интерферограммами для импульсных полупроводниковых лазеров, работающих в режимах модуляции добротности и модуляции усиления. Осцилляции поля с периодом около 1 пс (это намного меньше времени обхода светом резонатора лазера 3,1 пс) отчетливо видны на рис.3, а и с. Этим двум

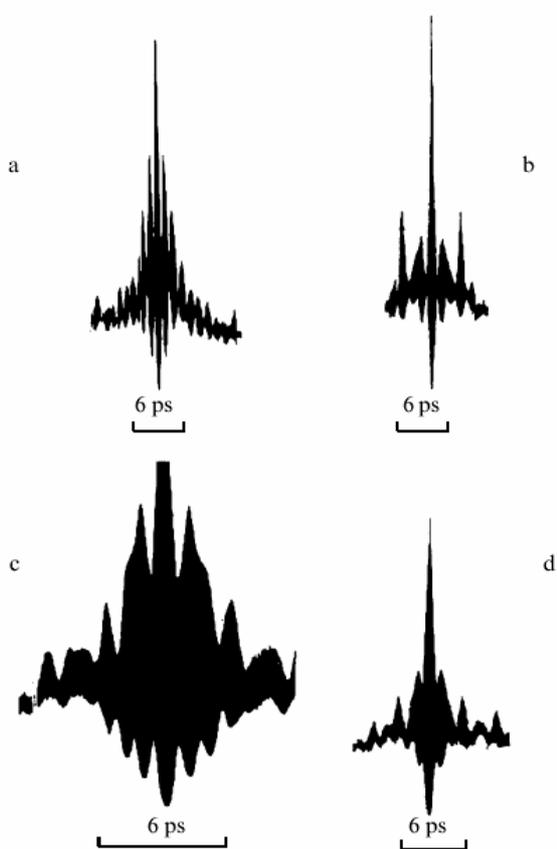


Рисунок 3. Автокорреляционные функции интенсивности, снятые с фемтосекундной точностью и разрешением отдельных интерференционных колец, демонстрирующие когерентные свойства излучения при различных условиях накачки.

интерферограммам соответствуют оптические спектры в виде дублетов, аналогичные представленному на рис. 2, d.

Далее следует обзор публикаций, посвященных теоретическим исследованиям динамики генерации лазеров, включая полупроводниковые. На основании результатов одной из работ получена оценка минимально возможной длительности импульса, генерируемого полупроводниковым лазером: $\Delta t_{\min} \approx 0,1$ пс.

В параграфе 3.2 определены объект моделирования и геометрия задачи; исходя из волнового уравнения Максвелла и системы уравнений Блоха, получены уравнения модели, описывающие динамику медленно меняющихся амплитуд мод лазера во взаимодействии с системой уровней полупроводника:

$$\frac{\partial V_{jk}}{\partial t} = -\frac{V_{jk}}{T_2} + \frac{\kappa}{2} F_j s_{3,k} \exp(i(-\omega_k + \omega_j)t) \quad (15),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s_{3,k}(t, z)}{\partial t} = & -\kappa/2 \sum_{j,l=-N}^N \operatorname{Re}\{F_j^* V_{lk} \exp-i((\omega_k - \omega_j)t - (\omega_l/c_l - \omega_j/c_j)z)\} - \\ & -\frac{s_{3,k} - s_{3,k,0}}{T_1} - \frac{s_{3,k} - s_{3,k,f}}{T_f} + P_k \end{aligned} \quad (16),$$

$$\frac{\partial}{\partial z} F_j + \frac{1}{c_j} \frac{\partial}{\partial t} F_j = \frac{2\pi c_j}{\omega_j c^2} d \sum_{k=-N}^N \omega_k^2 N_k V_{jk}(t, z) \exp-i(\omega_k - \omega_j)t. \quad (17).$$

В этих уравнениях z – продольная координата резонатора, t - время V_{jk} и F_j – комплексные амплитуды резонансной поляризации и электрического поля, соответственно, s_3 – инверсия, T_1 , T_2 – соответственно, времена продольной и поперечной релаксации, T_f – время внутризонной релаксации, $\kappa = 2d/\hbar$, где d – дипольный момент перехода, c_j - фазовая скорость, P_k - накачка; индекс j соответствует номеру продольной моды, индекс k соответствует частоте перехода ω_k таким образом, что равным j и k соответствуют равные значения

$$\text{частоты; } N_k = N_C \int_{\hbar(\omega_k - \Delta\omega_{k-1}/2)}^{\hbar(\omega_k + \Delta\omega_k/2)} \rho_s(e) de, \quad N_C - \text{максимальная концентрация}$$

примесных носителей заряда в активной области генератора, участвующих во взаимодействии, $\Delta\omega_k = (\omega_{k+1} - \omega_k)$, $\rho_s(e)$ — плотность переходов с энергией e , $s_{3,k,f}$ – инверсия, имеющая распределение по энергиям, соответствующее распределению Ферми электронов в примесной зоне проводимости и дырок в примесной валентной зоне.

Полученные уравнения позволяют учесть дисперсионные свойства активной среды, линейное поглощение в резонаторе, эффекты дефазировки поляризации, межзонной и внутризонной релаксации, накачку.

В параграфе 3.3 представлены результаты численного расчета многомодовой генерации трехсекционного полупроводникового лазера, осуществленного с помощью уравнений модели. Исследованы динамика и

спектр интенсивности оптического сигнала на выходе резонатора. Показано, как размер и положение поглощающей области позволяют управлять параметрами генерации. Найдены условия, обеспечивающие режимы стабильной генерации пуга импульсов и генерации одиночного субпикосекундного импульса.

На основе полученных уравнений было осуществлено численное моделирование процесса. В качестве параметров выбраны характерные для арсенида галлия значения. Коэффициенты отражения для зеркал были выбраны равными 95 %. В излучающей области моделировалась накачка примесной зоны проводимости электронами и примесной валентной зоны дырками, соответствующая току 600 мА.

На рис. 4 приведены результаты исследования зависимости параметров генерируемых импульсов от размера поглощающей секции. Рассмотрены 3 случая, основные сведения о которых приведены в таблице 1.

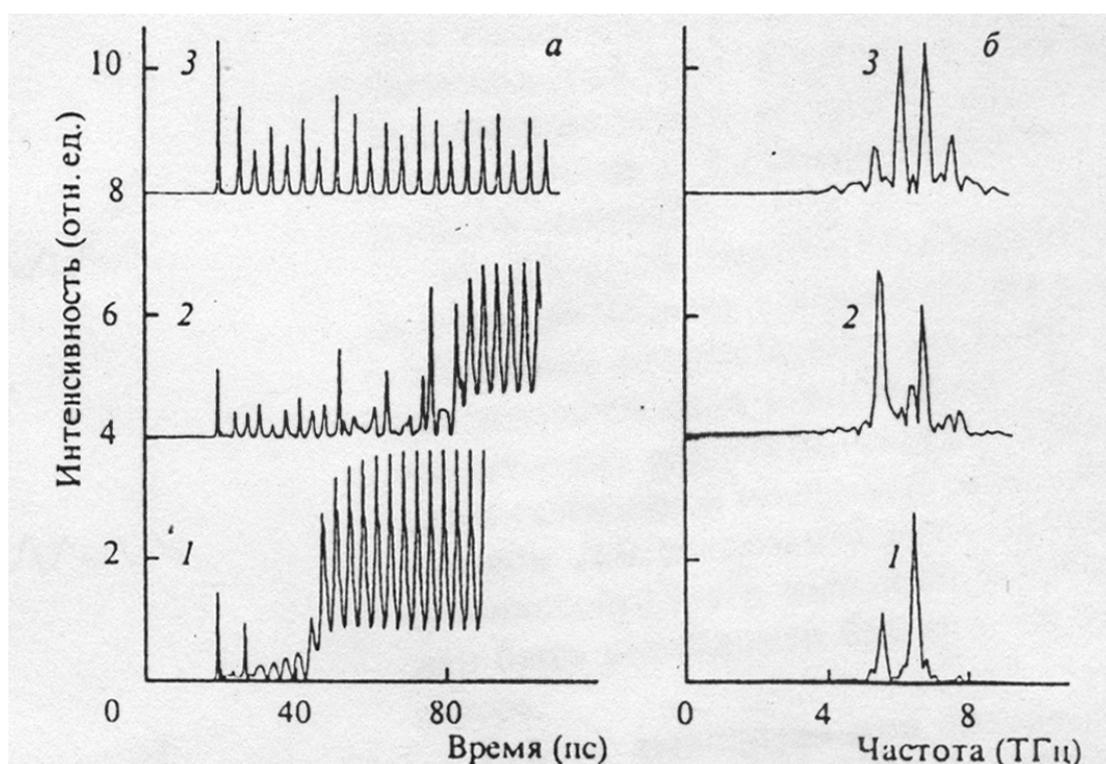


Рисунок 4. Временные профили (а) и спектры (б) интенсивности излучения на выходе резонатора

Таблица 1.

случаи	длина поглощающей секции, мкм	длительность импульсов, пс
1	10	2-2,5
2	20	2-2,5
3	40	0,7-1,1

С увеличением длины поглощающей секции происходит изменение спектра генерации лазера, сопровождающееся увеличением числа мод. При этом длительность импульсов уменьшается и достигает значений, меньших 1 пс, что в несколько раз меньше времени обхода резонатора, составляющего 3 пс.

На рис. 5 представлены временные профили излучения на выходе резонатора в зависимости от смещения поглощающей секции длиной 40 мкм относительно середины резонатора.

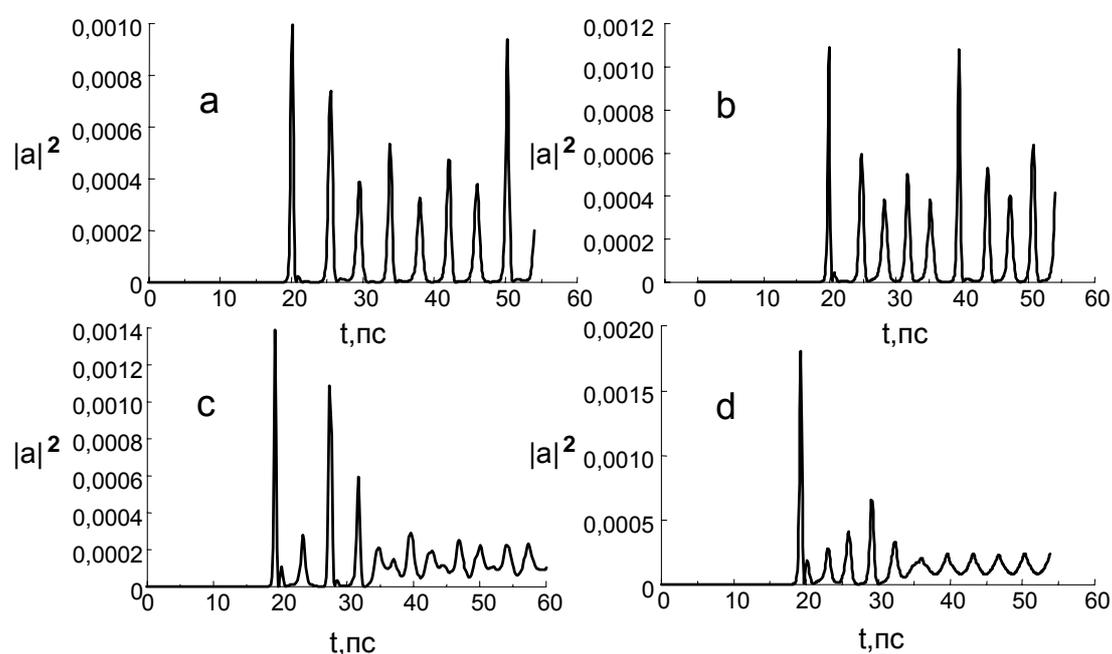


Рисунок 5. Временные профили излучения на выходе резонатора в зависимости от смещения поглощающей секции длиной 40 мкм относительно середины резонатора. Смещения: а) 0 мкм б) 7,5 мкм в) 15 мкм г) 22,5 мкм

С увеличением смещения происходит переход из режима генерации цуга импульсов к режиму генерации одиночного импульса.

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Анализ модели, описывающей стационарные процессы четырехфотонного комбинационно-параметрического преобразования, показал, что преобразование в невозбужденной среде линейно поляризованных и сонаправленных излучения накачки и пренебрежимо малого затравочного оптического сигнала на частоте Стокса с участием компонент произвольного

порядка протекает вне синхронизма и прекращается при строгом выполнении условия синхронизма.

2. Анализ системы уравнений, описывающей четырехфотонное комбинационно-параметрическое преобразование, показал существование солитонных состояний поля, содержащих множество стоксовых и антистоксовых компонент. Численным расчетом столкновения двух солитонов показана их устойчивость как к малым возмущениям, так и к малым значениям скорости поперечной релаксации, коэффициента штарковского сдвига частоты и отстройки от синхронизма. Согласованность фаз и амплитуд компонент солитона открывает возможность получения импульсов с длительностями, сравнимыми и меньшими, чем период оптического поля.

3. На основе модели, описывающей четырехфотонное комбинационно-параметрическое преобразование, рассчитана динамика распространения линейно поляризованных в одном направлении когерентных импульса накачки и пренебрежимо малого затравочного оптического сигнала на частоте Стокса, протекающего в нестационарных условиях, в режиме синхронизма. Число рожденных в этом процессе стоксовых и антистоксовых компонент достигает максимального значения, зависящего от значения коэффициента штарковского сдвига частоты; процесс рождения стоксовых и антистоксовых компонент не наблюдается в отсутствие штарковского сдвига.

4. Построена модель, позволившая описать преобразование в антистоксовы и стоксовы компоненты пробных импульсов при их распространении в комбинационно активной среде с наведенной когерентностью. Показано, что суммарное поле всех рожденных в этом процессе компонент имеет вид модулированного по фазе исходного пробного импульса, содержащего одну компоненту.

5. С помощью численного расчета в рамках многомодовой модели показано, что введение в резонатор инжекционного полупроводникового лазера поглощающего слоя позволяет управлять параметрами генерируемых импульсов. Оптимальный подбор толщины слоя и величины запирающего тока позволяет увеличить эффективную ширину полосы усиления и, таким образом, сократить длительность импульсов. Параметры генерируемых импульсов зависят также и от пространственного распределения коэффициента усиления, т.е. в рассмотренном случае от положения запирающего слоя в активной

области лазера. Проведенные расчеты показали, что расположение поглотителя посередине активной области генератора приводит к стабильной генерации цуга субпикосекундных импульсов, для реализации режима генерации одиночного субпикосекундного импульса поглощающий слой должен быть расположен ближе к торцу активной области лазера.

Публикации

1. А. В. Андреев, А. А. Валеев. *Динамика генерации субпикосекундных импульсов в полупроводниковых инжекционных лазерах.* // Квантовая электроника.-2000.-Т.30.-№2.-С.167-170.
2. А. В. Андреев, А. А. Валеев, В. Б. Морозов, А. Н. Оленин, В. Г. Тункин. *Временная динамика комбинационно-параметрического преобразования в среде с наведенной вращательной когерентностью.* // Квантовая электроника.-2002.-Т.32.-№1.-С.54-58.
3. А. В. Андреев, А. А. Валеев. *Полихроматические солитоны в условиях четырехфотонного комбинационно-параметрического взаимодействия.* // Квантовая электроника.-2003.-Т.33.-№6.-С.520-524.
4. A. V. Andreev, A. A. Valeev. *Generation of cascade Stokes and anti-Stokes components by stimulated Raman scattering in gases.* // XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics Minsk, Belarus, 2001.
5. A. V. Andreev, A. A. Valeev, V. B. Morozov, A. N. Olenin, V. G. Tunkin. *Widely ranged spectrum generation in hydrogen at coherent Raman excitation.* // International Quantum Electronics Conference Moscow, Russia, 2002.