

На правах рукописи



Ткаченко

Ткаченко Виктор Александрович

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Слабко Виталий Васильевич

Официальные оппоненты: *Вальков Валерий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, заведующий лабораторией.*

Шаповалов Константин Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого» Министерства здравоохранения РФ, доцент;

Ведущая организация: *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск*

Защита состоится «__» __ 201_ г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д.003.075.02 Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) по адресу: 660036 г. Красноярск, Академгородок, 50, стр.38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на сайте <http://kirensky.ru>.

Автореферат разослан «__» ____ 201_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Втюрин А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Нелинейная оптика уже долгое время является динамично развивающейся областью физики, которая позволяет решать важные прикладные и инженерные задачи. Исследования нелинейных оптических процессов способствовали развитию лазерной техники, оптоволоконных линий связи, спектроскопии, фотоники и оптоинформатики, а также использованию оптики в таких отраслях как экология и медицина.

Основная задача любого нелинейного параметрического оптического устройства – преобразование частоты. Хотя обычно в оптике рассматривается задача, когда взаимодействующие волны распространяются в среде в одном направлении, взаимодействие волн, распространяющихся на встречу друг другу, как было показано в ряде работ [1-3], позволяет достичь гораздо большей эффективности преобразования. Такое встречное взаимодействие открывает возможность создания без зеркальных параметрических генераторов и миниатюрных параметрических усилителей света [4-6].

Однако, встречное взаимодействие в литературе рассматривается редко, из-за сложностей реализации, связанных с необходимостью согласования фаз противораспространяющихся волн (закон сохранения импульсов волн) [7]. На сегодняшний день существует несколько подходов решения данной проблемы.

Наиболее естественным образом фазовое согласование встречных волн может быть обеспечено благодаря использованию метаматериалов с отрицательным показателем преломления, в которых вектор Пойтнинга волны и её фазовая скорость противоположны в узкой полосе частот [8]. Оптические метаматериалы в свою очередь открывают широкие возможности, такие как создание суперлинзы с разрешением, превышающим дифракционный предел, и достижение эффекта невидимости объекта [9]. Существующие прототипы сред с отрицательной дисперсией в большинстве своём обладают высокими показателями потерь на рабочих частотах, данная проблема может

быть решена благодаря параметрической компенсации при взаимодействии встречных волн [10].

Кроме этого фазовое согласование при взаимодействии встречных волн может быть обеспечено с использованием ряда других подходов и в других частотных диапазонах электромагнитных волн. Эти процессы также могут наблюдаться при взаимодействии волн любой природы: в процессе вынужденного комбинационного рассеяния [11], в случае вынужденного рассеяния Манделштамма-Бриллюена [1,4,12], взаимодействие встречных волн разного диапазона в условиях квазисинхронизма [6,13,14] (в среде с периодической модуляцией нелинейных характеристик), в лампе обратной волны. Таким образом, исследование данных процессов охватывает широкую область явлений.

Хотя основной характеристикой процессов параметрического взаимодействия является эффективность преобразования энергии, часто возникает необходимость контролировать форму и длительность импульса. В некоторых случаях эти требования входят в коллизию. Так с одной стороны взаимодействие встречных волн позволяет достигать аномально большого усиления по сравнению с обычным параметрическим взаимодействием, распространяющихся в одном направлении. С другой стороны в ряде работ было отмечено, что в случае взаимодействия встречных волн имеют место особенности переходных процессов изменения амплитуды выходного сигнала, которые способны вносить сильные искажения в работу импульсных устройств [5,15-17]. В настоящее время данные переходные процессы слабо изучены и являются предметом рассмотрения представленной диссертации. Сказанное выше в достаточной мере обосновывает **актуальность** проведённых исследований и их **практическую значимость**.

Цель диссертационной работы – Выявить особенности и закономерности переходных процессов при параметрическом взаимодействии встречных волн.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- Численными методами исследовать основные характеристики переходных процессов при параметрическом взаимодействии встречных волн в режиме усиления и генерации в приближении заданного поля накачки (линейный режим).

- Исследовать численно основные характеристики переходных процессов в режиме усиления с учётом истощения накачки (нелинейный режим)

- Исследовать численно основные характеристики переходных процессов в импульсном режиме.

Научная новизна

- Впервые были выявлены закономерности переходных процессов при параметрическом взаимодействии встречных волн. В приближении заданной накачки (линейное приближение) получены аппроксимирующие зависимости для временного поведения амплитуды сигнала на выходе из среды и зависимость постоянной времени этого процесса от параметров усиления $a_{30}KL$.

- Показано, что характер переходных процессов в линейной и нелинейной области значений параметров усиления $a_{30}KL$ принципиально отличается. При превышении границы линейного приближения ($a_{30}KL > \pi/2$) длительность переходного процесса сокращается, а сам процесс приобретает характер самовозбуждения.

- Впервые показано, что максимум времени переходного процесса определяется значениями поглощения взаимодействующих волн в среде и соответствует границе линейного приближения для параметров усиления.

- Нестационарная модель была впервые использована для интерпретации экспериментальных данных, полученных при параметрическом взаимодействии встречных волн в беззеркальном параметрическом генераторе. Показано, что замедление роста эффективности преобразования с ростом интенсивности накачки, наблюдаемое в эксперименте, обусловлено временной стохатизацией.

Практическая значимость и использование результатов работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке новых параметрических устройств взаимодействия встречных волн, таких как миниатюрный параметрический усилитель света и беззеркальный генератор. А также при интерпретации ряда других явлений, в которых проявляются элементы параметрического взаимодействия встречных волн.

Достоверность полученных результатов обеспечена обоснованностью использованных в работе теоретических методик исследования, их совпадением, в предельных случаях с результатами работ других авторов и качественное согласие результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Временное поведение амплитуды генерируемых при параметрическом взаимодействии встречных волн в линейном приближении аппроксимируется зависимостью: $a_2 = a_{20}(1 - e^{-t/\tau})$. Зависимость постоянной времени τ от параметров усиления $a_{30}KL$ аппроксимируется выражением: $\tau = \Delta t / \cos(a_{30}KL)$.

2. При взаимодействии встречных волн положение максимума времени переходного процесса и порога самовозбуждения в зависимости от параметров усиления $a_{30}KL$ соответствуют граничному значению линейного приближения, определяемому индексами потерь.

3. Обнаруживаемая в нестационарной модели параметрического взаимодействия встречных волн стохатизация процесса прямого и обратного преобразования в неоднородном поле накачки – основная причина замедленного роста эффективности преобразования, наблюдаемого в эксперименте.

Личный вклад соискателя заключается в постановке, совместно с научным руководителем, цели и задач исследования; в моделировании процессов параметрического взаимодействия встречных волн; исследовании основных характеристик процесса; анализе и интерпретации данных; в

подготовке научных статей и тезисов докладов, отражающих основные результаты исследования.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на третьей международной школе-семинаре «Фотоника нано- и микроструктур» («ФНМС 2015»), Томск, 7-11 сентября, 2015г.; международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы 2016», посвящённой году образования в содружестве независимых государств, Красноярск, 15-25 апреля, 2016г.; 22-ой всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых («ВНКСФ-22»), Ростов-на-Дону, 21-28 апреля, 2016г.; 17-я международная конференции Laser Optics – 2016, Санкт-Петербург, 27 июня - 01 июля 2016г.; международной конференции когерентной и нелинейной оптики ICONO/LAT-2016, Минск (Республика Беларусь), 26-30 сентября 2016г.; ежегодной международной конференция Days of Diffraction-2017, Санкт-Петербург, 19-23 июня, 2017г.; международном симпозиуме PIERS-2017, Сингапур (Республика Сингапур), 19-22 ноября, 2017г.; международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы 2018», Красноярск, международная, 23-27 апреля, 2018г.

Работа поддержана грантами: РФФИ в рамках научного проекта № 16-42-240410 р_а и в рамках научного проекта № 18-32-00864 мол_а.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ: 5 статьи в изданиях по списку ВАК, из них 4 статьи в зарубежных журналах и 7 работ в сборниках тезисов международных и всероссийских конференций.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует формуле и п.6 Паспорта специальности 01.04.05 Оптика: «Действие света. Передача энергии-импульса, динамические процессы при взаимодействии света с веществом, процессы выделения энергии веществом при световом воздействии. Световое управление движением и квантовым состоянием атомов. Фотоэлектрические явления.

Фотохимические процессы. Детектирование излучения. Самовоздействие света в среде. Нелинейная оптика. Распространение оптических импульсов сверхвысоких мощностей и сверхмалых длительностей.»

Объем и структура диссертации

Материалы диссертационной работы изложены на страницах основного текста 99, рисунков 33, таблиц 0. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов, списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной диссертационной темы исследования, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены научные положения, выносимые на защиту, личный вклад соискателя, а также апробация работы и структура диссертации.

Первая глава посвящена литературному обзору особенностей взаимодействия встречных волн, подходов реализации фазового согласования встречных волн, в частности проблеме создания метаматериалов, как самых привлекательных сред для применения принципов параметрического взаимодействия встречных волн. Большое внимание также уделено обзору работ, обнаруживающих временные особенности, возникающие при взаимодействии встречных волн, которые являются объектом исследования данной диссертации.

Во второй главе приводится вывод системы укороченных уравнений трёх связанных волн в среде с отрицательной дисперсией на основе подхода, который рассматривает магнитную дисперсию как проявление пространственно-временной не локальности электрического отклика среды. Приводится обоснование такого подхода.

На основе выведенного уравнения рассматривается модель параметрического взаимодействия встречных волн в приближении заданного

поля накачки. В решаемой задаче непрерывная волна накачки и полубесконечный затравочный импульс сигнала подавались в одном направлении, генерируемая холостая волна в противоположном направлении.

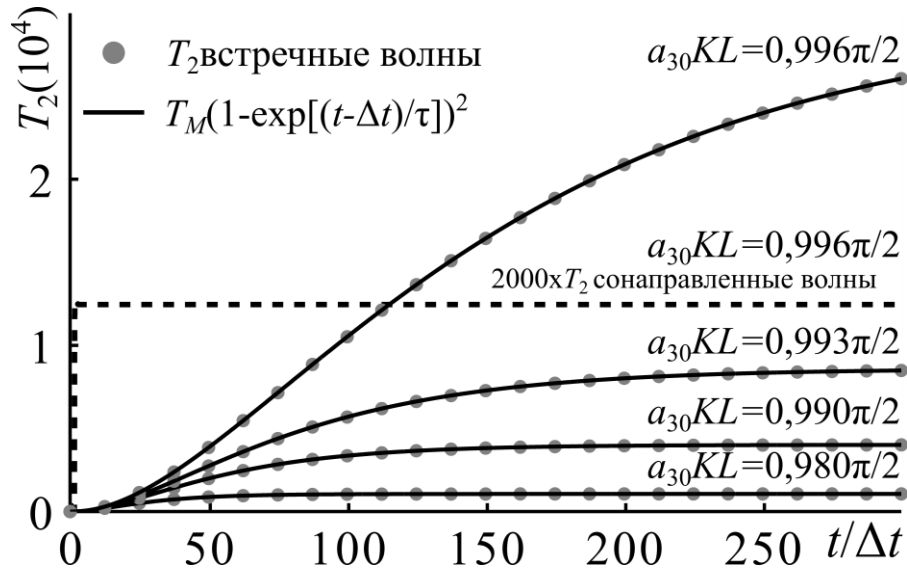


Рисунок 1. Временная зависимость интенсивности сигнала на выходе из среды нормированной на интенсивность на входе в среду $T_2 = |a_{2L}/a_{20}|^2$ при разных значениях параметров усиления $a_{30}KL$. Серые круги – рассчитанная зависимость; сплошные линии – аппроксимация $T_2 = T_M(1 - \exp(-t/\tau))^2$; штриховая линия – случай взаимодействия сонаправленных волн (увеличенный в 2000 раз)

Численными методами с использованием программного пакета COMSOL были получены временные зависимости интенсивности усиливаемого сигнала на выходе из среды (Рисунок 1), которые демонстрируют длительный переходной процесс, длительность которого может в сотни раз превосходить время группового запаздывания $\Delta t = L/v$ (время, за которое фронт сигнала проходит через среду). Детальный анализ позволил разделить полученные зависимости на два временных этапа: ранний этап и поздний этап. Как было показано, поведение амплитуды на раннем этапе отличается для распространяющихся в одном и другом направлении усиливаемых волн. Отличия проявляются также при выборе различных граничных условий: режим стационарной накачки и полубесконечного импульса сигнала и режим стационарного сигнала и полубесконечного импульса накачки. Длительность

раннего этапа не превышает удвоенный промежуток времени группового запаздывания $2\Delta t$.

Временное поведение интенсивности сигнала на выходе из среды на позднем этапе описывается экспоненциальным выражением вида $T_2 = T_M(1 - \exp(-t/\tau))^2$, которое является стандартным для линейных переходных процессов в радиотехнике. Постоянная времени τ , определяет длительность второго этапа переходного процесса, может в сотни раз превышать время группового запаздывания.

В результате анализа множества временных зависимостей были получены зависимости постоянной времени группового запаздывания от величин групповых скоростей волн и значений параметров усиления $a_{30}KL$: K – коэффициент нелинейной связи волн, a_{30} – амплитуда накачки, L – длина среды. Показано, что время процесса обратно пропорционально групповым скоростям (увеличение скорости любой из волн в два раза приводит к уменьшению времени в два раза). Кроме этого показано (Рисунок 2), что время переходного процесса неограниченно растёт с ростом параметров усиления в приближении заданного поля накачки при стремлении к границе $a_{30}KL = \pi/2$ и описывается выражением $\tau = \Delta t / \cos(a_{30}KL)$. Полученная формула симметрична формуле усиления при взаимодействии встречных волн, получаемого из стационарной задачи $a_2/a_{20} = 1/\cos(a_{30}KL)$, что свидетельствует о тесной связи временной и амплитудной составляющей: большое усиление в среде достигается за счёт длительного времени переизлучения оптической энергии через пространственно-временные обратные связи, возникающие за счёт того, что волны распространяются на встречу друг другу.

Кроме этого во второй главе было исследовано, как на ход переходного процесса влияет наличие потерь в среде на частотах сигнала и холостой волны и неточность фазового согласования. Показано, что с ростом потерь асимптота зависимости $\tau(a_{30}KL)$ сдвигается в область больших значений $a_{30}KL$ и может быть рассчитана из решения стационарного уравнения, полученного в работе [2]. С ростом величины фазового рассогласования время роста амплитуды на

выходе уменьшается, однако время переходного процесса остаётся неизменным благодаря появлению затухающих осцилляций.

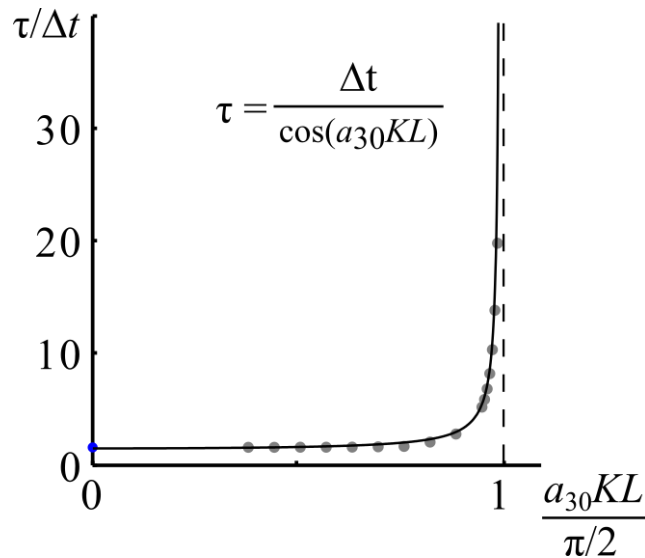


Рисунок 2. Зависимость постоянной времени переходного процесса от параметров усиления $a_{30}KL$ в приближении заданного поля. Серые круги – рассчитанная зависимость; сплошная линия – аппроксимация.

Третья глава посвящена исследованию переходных процессов при взаимодействии встречных волн с учётом истощения накачки. Рассматривалась задача аналогичная задаче из второй главы, при этом решалась полная система уравнений (с учётом изменяющейся амплитуды накачки) с значениями параметров усиления превышающими граничные для линейного приближения $a_{30}KL > \pi/2$. Таким образом, задача решалась в нелинейной области значений параметров $a_{30}KL$.

В результате численного решения были получены временные зависимости сигнала на выходе из среды. Показано, что в нелинейной области эти зависимости приобретают скачкообразный вид (вид ступеньки с точкой перегиба посередине). Время переходного процесса в нелинейной области уменьшается с ростом параметров усиления $a_{30}KL$. Таким образом, время переходного процесса имеет максимум в точке являющейся границей нелинейной области. Для подтверждения этого было проведено исследование зависимостей $\tau(a_{30}KL)$ при разных значениях индексов потерь α_i . Результат

показал, что положение границы нелинейной области, определяемое из стационарного решения [2], совпадает с положением максимума времени переходного процесса (Рисунок 3. чёрные и серые круги). Однако, таким образом, можно учесть лишь потери на частотах сигнальной и холостой волны. В главе приведены результаты расчётов, которые показывают, что появление потерь на частоте накачки $\alpha_3 \neq 0$ приводит к смещению максимума τ_{\max} в область больших значений $a_{30}KL$ (Рисунок 3. чёрные и серые кресты).

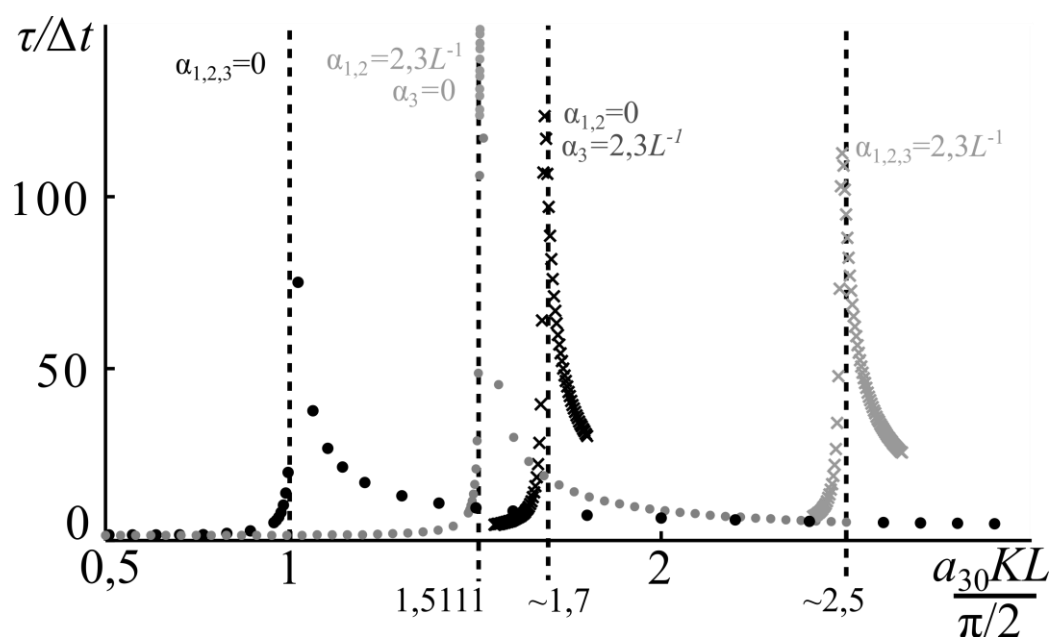


Рисунок 3. Зависимости постоянной времени переходного процесса от параметров усиления при различных значениях индексов потерь α_i . Серые круги – рассчитанная зависимость; сплошная линия – аппроксимация.

Также в главе рассматривается, как в нелинейной области на ход переходного процесса влияет наличие фазового рассогласования. Показано, что с увеличением фазового рассогласования растёт время переходного процесса в нелинейной области.

В **четвёртой** главе рассматривается взаимодействие встречных волн в импульсном режиме. По условиям задачи прямоугольный импульс сигнала входит в среду, через среду непрерывно подаётся накачка, холостая встречная волна изначально отсутствует.

В первую очередь было рассмотрено, как искажается импульс при взаимодействии встречных волн при прохождении через среду. Численными методами были получены временные профили импульсов на выходе из среды. Показано, что импульс усиливается неравномерно. Задний фронт усиливается значительно сильнее переднего, при этом импульс удлиняется за счёт того, что позади него формируется длительный параметрический след. Длительность этого следа увеличивается с ростом параметров усиления. В нелинейной области след становится самоподдерживающимся. Таким образом, в нелинейной области обнаруживается режим самовозбуждения, и граница нелинейной области является порогом самовозбуждения. В четвёртой главе рассматривается, как порог самовозбуждения смещается вместе с границей нелинейной области также как это показано для максимума τ в главе 3.

Кроме этого в четвёртой главе произведено сравнение с экспериментальными данными. Рассматриваются результаты статьи [6] – одна из первых работ в которой описан экспериментально реализованный без зеркальный параметрический генератор света на основе взаимодействия встречных волн. Фазовый синхронизм достигался за счёт квазисинхронизма в периодически поляризованном KTiOPO_4 кристалле. В кристалл подаётся пикосекундный импульс накачки, на выходе измеряется энергия сгенерированных импульсов сигнала и холостой волны (Рисунок. 4а квадраты и круги) и эффективность преобразования накачки в зависимости от интенсивности импульса накачки (Рисунок. 4а чёрные треугольники). В статье было показано, что эффективность преобразования замедленно растёт с ростом интенсивности накачки. Однако используемая в этой статье стационарная теория предсказывает линейный рост.

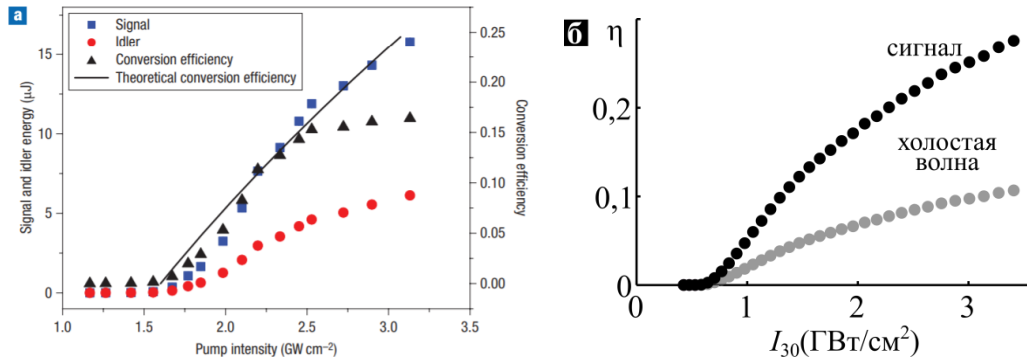


Рисунок 4. (а) – Экспериментальные данные из статьи [6]. Зависимость энергии импульса сигнала (квадраты), холостой волны (круги) и эффективности преобразования (треугольники) от интенсивности накачки. (б) – зависимость эффективности преобразования накачки в сигнал и холостую волну от интенсивности накачки.

Данные из экспериментальной работы [6] были использованы в качестве параметров нестационарной модели, рассматриваемой в данной диссертации. При этом принималось, что импульс накачки имеет временной и поперечный профили в форме Гаусса и малый затравочный сигнал изначально присутствует в среде. Кроме этого было показано, что генерируемый импульс сигнала становится сильно изрезанным во времени при взаимодействии (разделяется на много мелких пиков) в результате стохастической перекачки энергии в импульс сигнала и обратно в импульс сигнала. При этом полученная в результате численного решения зависимость эффективности преобразования интенсивности в сигнал и холостую волну от интенсивности накачки растёт замедленно (Рисунок 4б). Таким образом, временная модель, рассматриваемая в данной диссертации, соответствует эксперименту и позволяет объяснить замедленный рост эффективности преобразования за счёт временной стохатизации процесса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получена аппроксимация существенного временного поведения амплитуды сигнала на выходе из среды при включении взаимодействия встречных волн в приближении заданной накачки. Аппроксимация имеет вид типичный для линейных переходных процессов радиотехнике и позволяет определить постоянную времени процесса. Для постоянной времени получена аппроксимирующая зависимость в приближении заданной накачки от параметров усиления: длины среды, величины амплитуды накачки и коэффициента связи волн.

2. Показано, что в нелинейной области значений параметров усиления, постоянная времени переходного процесса уменьшается с ростом значений параметров усиления, а переходной процесс изменения амплитуды сигнала на выходе из среды приобретает скачкообразный вид.

3. Граница линейной области изменения параметров усиления изменяется в зависимости от потерь в среде. Её положение при наличии потерь на частотах генерируемых волн может быть точно определено из феноменологической формулы решения стационарной модели в приближении заданного поля. Увеличение потерь на частоте накачки, качественно приводит к сдвигу границы в область больших значений.

4. Наличие фазового рассогласования в линейной области изменения параметров усиления не приводит к изменению времени переходного процесса. В нелинейной области постоянная времени растёт с ростом величины фазового рассогласования

5. В линейной области изменения параметров усиления при взаимодействии встречных волн короткий импульс (с длительностью меньше постоянной времени переходного процесса) претерпевает сильные искажения: задняя часть импульса усиливается намного сильнее передней, позади импульса формируется длинный параметрический след.

6. Режим самовозбуждения при взаимодействии встречных волн теоретически может быть достигнут при любом значении потерь в среде, при

этом система возбуждается от любого сколь угодно малого затравочного импульса. Порог самовозбуждения соответствует границе линейной области изменения параметров усиления – он изменяется при наличии потерь аналогичным образом.

7. Нестационарное рассмотрение взаимодействия с встречных волн позволяет получить результат адекватный эксперименту и качественно объяснить замедленный рост эффективности преобразования наблюдавшийся при параметрическом взаимодействии встречных волн в экспериментальной работе [6].

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РЕКОМЕНДОВАННЫЕ ВАК

1. Slabko V. V., Three-wave mixing of ordinary and backward electromagnetic waves: extraordinary transients in the nonlinear reflectivity and parametric amplification / V. V. Slabko, A. K. Popov, V. A. Tkachenko, S. A. Myslivets // *Optics Letters*. — 2016. — Vol. 41, no. 17. — P. 3976–3979.

2. Слабко В. В. Transient processes in the parametric interaction of counter-propagating waves / В. В. Слабко, А. К. Попов, С. А. Мысливец, Е. В. Рассказова, В. А. Ткаченко, А. К. Москалёв // *Квантовая Электроника*. – 2015. - 45(12). – с.1151–1152.

3. Tkachenko V.A., Extraordinary time-depended processes in the parametric interaction of counterpropagating waves / V.A. Tkachenko, A. S. Tsipotan, S. A. Myslivets, V.V. Slabko // *Progress in electromagnetics Research Symposium 2017*. – – Singapore : IEEE, 2018. — P. 17563866.

4. Slabko V.V., Extraordinary time-depended processes in the parametric interaction of counterpropagating waves / V.V. Slabko, A. K. Popov, S. A. Myslivets, V.A. Tkachenko // *Laser Optics (LO), 2016 International Conference*. — St. Peterburg : IEEE, 2016. — P. 16251717.

5. Popov A. K., Shaping Light in Backward-Wave Nonlinear Hyperbolic Metamaterials / A. K. Popov, S. A. Myslivets, V.V. Slabko, V. A. Tkachenko, T. F. George // *Photonics*. — 2018. — Vol. 5, no. 2(8).

ДРУГИЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

6. Ткаченко В. А., Особенности переходных процессов при параметрическом взаимодействии встречных волн / В. А. Ткаченко, Е. В. Рассказова, А. К. Москалёв, В. В. Слабко // Школа семинар фотоника нано и микро структур (ФНМС-2015): материалы. — Томск : Изд-во ТУСУРа, 2015.

7. Ткаченко В. А. Нестационарные процессы при параметрическом взаимодействии встречных волн // Сборник тезисов, материалы Двадцать второй Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-22). — Ростов-на-Дону : издательство АСФ России, 2016. — С. 291.

8. Ткаченко В. А. Особенности переходных процессов при взаимодействии встречных волн с учётом истощения накачки // Материалы международной научно-практической конференции "Молодежь и наука: Проспект Свободный - 2016". — Красноярск: Библиотечно издательский комплекс Сибирского федерального университета, 2016. — С. 36–39.

9. Slabko V.V., Parametric amplification with backward waves: Pulse shapes / V.V. Slabko, A. K. Popov, S. A. Myslivets, V.A. Tkachenko // Technical digest of international conference ICONO/LAT 2016. — Minsk, 2016.

10. Popov A. K., Frequency mixing of guided electromagnetic waves in hyperbolic metamaterials / A. K. Popov, V.V. Slabko, V.A. Tkachenko, S. A. Myslivets, I. S. Nefedov // 50th international conference DAYS ON DIFFRACTION 2017 ABSTRACTS. — St. Peterburg, 2017. — P. 119.

11. Tkachenko V.A., Effects of Losses and Phase Mismatch on Transient Processes in Parametric Amplification through Three-wave Mixing of Ordinary and Backward Electromagnetic Waves / V.A. Tkachenko, A. S. Tsipotan, S. A.

Myslivets, V. V. Slabko, A. K. Popov // PIERS-2017 Abstracts. — Singapore : Electromagnetic Academy, 2017. — P. 933–934.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bobroff D L. Coupled-Modes Analysis of the Phonon-Photon Parametric Backward-Wave Oscillator // [Journal of Applied Physics](#). — 1965. — Vol. 36, no. 5. — P. 1760–1769.
2. Popov A. K., Negative-index metamaterials: second-harmonic generation, Manley–Rowe relations and parametric amplification / A. K. Popov, V. M. Shalaev // [Applied Physics B](#). — 2006. — Vol. 84, no. 1. — P. 131.
3. Shalaev M. I., Negative group velocity and three-wave mixing in dielectric crystals / M. I. Shalaev, S. A. Myslivets, V. V. Slabko, V. M. Shalaev, A. K. Popov // [Optics Letters](#). — 2011. — oct. — Vol. 36, no. 19. — P. 3861.
4. Harris S E. PROPOSED BACKWARD WAVE OSCILLATION IN THE INFRARED // [Applied Physics Letters](#). — 1966. — Vol. 9, no. 3. — P. 114–116.
5. Воляк К. И., Исследование параметрического генератора с обратной волной. Радиотехника и электроника / К. И. Воляк, А. С. Горшков // Радиотехника и Электроника. — 1973. — Т. 18, № 10. — С. 2075.
6. Canalias C., Mirrorless optical parametric oscillator / C. Canalias, V. Pasiskevicius // [Nature Photonics](#). — 2007. — aug. — Vol. 1. — P. 459.
7. Robert Boyd. *Nonlinear Optics*. — 2nd Edition. — Academic Press, 2002. — P. 576.
8. Shadrivov I. V., Second-harmonic generation in nonlinear left-handed metamaterials / Shadrivov I. V., Zharov A. A, Kivshar Y. S. // [Journal of the Optical Society of America B](#). — 2006. — Vol. 23, no. 3. — P. 529–534.
9. Grbic A., Overcoming the Diffraction Limit with a Planar Left-Handed Transmission-Line Lens / A. Grbic, G. V. Eleftheriades // [Physical Review Letters](#). — 2004. — Vol. 92, no. 11. — P. 117403.
10. Popov A. K, Compensating losses in negativeindex metamaterials by optical parametric amplification // A. K. Popov, V. M. Shalaev // [Optics Letters](#). — 2006. — Vol. 31, no. 14. — P. 2169–2171.

11. Popov A. K., Enhancing coherent nonlinear-optical processes in nonmagnetic backward-wave materials / A. K. Popov, M. I. Shalaev, S. A. Myslivets, V. V. Slabko, I. S. Nefedov // [Applied Physics A](#). — 2012. — dec. — Vol. 109, no. 4. — P. 835–840.
12. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. — Москва : Наука, 1989.—С. 560.
13. Conti C., Cavityless oscillation through backward quasi-phase-matched second-harmonic generation / C. Conti, G. Assanto, S. Trillo // [Optics Letters](#). — 1999. — Vol. 24, no. 16. — P. 1139–1141.
14. Minor C. E., Mirrorless optical parametric oscillation in bulk PPLN and PPLT: a feasibility study / C. E. Minor, R. S. Cudney // [Applied Physics B](#). — 2017. — Vol. 123, no. 1. — P. 38.
15. Kaup D. J., Space-time evolution of nonlinear three-wave interactions. I. Interaction in a homogeneous medium / D. J. Kaup, A. Reiman, A. Bers // [Rev. Mod. Phys.](#) — 1979. — Vol. 51, no. 2. — P. 275–309.
16. Preobrazhensky V Explosive instability of quasi-phonon triads in antiferromagnet under frequency modulated electromagnetic field / V. Preobrazhensky, O. Yevstafyev, P. Pernod, V. Berzhansky // [Journal of Magnetism and Magnetic Materials](#). — 2010. — Vol. 322, no. 6. — P. 585–588.
17. Preobrazhensky V., Supercritical dynamics of magnetoelastic wave triad in a solid / V. Preobrazhensky, O. Yevstafyev, P. Pernod, O. Bou Matar, V. Berzhansky // [Physics of Wave Phenomena](#). — 2012. — Vol. 20, no. 4. — P. 256–263