

На правах рукописи



ШАЛАЕВ Михаил Игоревич

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ, КАК ПРИМЕР
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН В СРЕДАХ С
ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Специальность 01.04.05 Оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Красноярск
2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГАОУ ВПО) «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Научный руководитель: **Слабко Виталий Васильевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой фотоники и лазерных технологий
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Официальные оппоненты: **Архипкин Василий Григорьевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией когерентной оптики ФГБУ
науки Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского
отделения Российской академии наук

Подопригора Владимир Георгиевич
доктор физико-математических наук, профессор кафедры
математических методов и информационных технологий
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Ведущая организация: ФГБУ науки Институт математического моделирования Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «24» декабря 2013г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 003.055.01 при ФГБУ науки Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук по адресу 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр 38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Л. В. Киренского

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.055.01
доктор физ.- мат. наук, профессор



Втюрин
Александр
Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В последние годы среды с отрицательной дисперсией обладающие уникальными физическими свойствами вызывают значительный интерес исследователей. Естественных материалов, обладающих такими свойствами не существует, и исследования ведутся в направлении создания искусственных сред, получивших название метаматериалов. Интерес к ним прежде всего связан с тем, что многие явления и законы как классической, так и нелинейной оптики для сред с отрицательной дисперсией должны быть пересмотрены. К ним, в частности относятся законы преломления на границе раздела двух сред с положительными и отрицательным показателем преломления, эффекты Доплера, Вавилова – Черенкова, соотношения Мэнли – Роу и др. Кроме того такие среды могут быть использованы для решения ряда практических задач, одним из примеров которых может служить преодоление дифракционного предела оптических приборов с линзой, имеющей отрицательный показатель преломления.

Определённый интерес вызывают нелинейно – оптические процессы взаимодействия волн в таких средах, в частности процессы параметрического взаимодействия волн. Так, в частности, для сред с отрицательным показателем возможна реализация режима взаимодействия встречных волн с гигантским усилением, превышающим экспоненциальное. Для проявления нелинейно-оптических эффектов необходимы протяжённые и объёмные среды с отрицательным показателем, которые к настоящему времени создать не удалось. Тем не менее, ещё в работах Мандельштама было отмечено, что аналогичными свойствами обладают среды, в которых групповая и фазовые скорости волн противоположно направлены. Им же было отмечено, что этими свойствами обладают оптические фононы в кристаллах. Таким образом процесс фотон-фононного взаимодействия в процессе комбинационного рассеяния света в существующих кристаллах может служить примером параметрического взаимодействия в средах с отрицательной дисперсией и его рассмотрение представляет определенный интерес

для экспериментальной проверки предсказанных теоретически закономерностей. Сказанное выше в достаточной мере обосновывает **актуальность** представленных в диссертации результатов.

Цель и задачи диссертационного исследования

Цель диссертации - Теоретическое исследование процесса вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) света на оптической фоновой ветви как пример параметрического взаимодействия волн в средах с отрицательной дисперсией.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих исследовательских **задач**:

1. Исследовать процесс ВКР в стационарном режиме и в приближении заданного поля накачки для выяснения условий проявления эффекта встречной волны;

2. Аналитически исследовать процесс ВКР в импульсном режиме накачки на основе разработанной простой модели описывающую процесс параметрического взаимодействия света в средах с отрицательной дисперсией и выявить наиболее значительные отличия импульсного и непрерывного режимов;

3. Численный анализ решения системы нелинейных уравнений описывающие рассматриваемый процесс ВКР, с учетом истощения накачки волны, как в импульсном так и в стационарном режимах.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложена естественная среда, обладающая свойствами метаматериала с отрицательным показателем преломления в процессах параметрического взаимодействия волн;

2. Показано, что негативное влияние диссипации одной из взаимодействующих волн на проявления эффекта встречной волны в параметрических процессах, может быть значительно ослаблено при использовании фемтосекундных импульсов накачки, по сравнению со стационарным режимом;

3. Предсказан длительный переходной режим установления стационарной картины при параметрическом взаимодействии

встречных волн, отсутствующий при взаимодействии волн однонаправленных;

4. Показано, что значительное увеличение интенсивности накачки по сравнению с ее минимальным значением, необходимым для проявления эффекта встречной волны, позволяет значительно сократить время переходного процесса.

Практическая значимость

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке высокоэффективных преобразователей частот основанных на параметрическом взаимодействии волн. Предложенная аналитическая модель может быть полезна при анализе параметрических нелинейно-оптических процессов в импульсном режиме генерации.

Научные положения выносимые на защиту диссертации

1. Для процесса параметрического взаимодействия волн в импульсном режиме эффект встречной волны, возможен при умеренных значениях интенсивности накачки и длины нелинейной среды, в отличие от стационарного режима, при котором требуемая интенсивность накачки значительно превышает пороговые значения для оптического пробоя кристаллов.

2. Предложенная простая аналитическая модель для решения нестационарной задачи параметрического усиления в приближении заданного поля накачки позволяет оценить значения параметров среды и поля, необходимые для достижения режима встречной волны, а так же проанализировать временные параметры процесса.

3. Значительное превышение интенсивности накачки, по сравнению с ее минимальным значением, необходимым для проявления эффекта встречной волны, в импульсном режиме позволяет реализовать условия усиления выше экспоненциального, и осуществить практически полное преобразование при достижимых параметрах среды и поля.

Апробация результатов исследования осуществлена в публикациях, докладах и выступлениях на следующих конференциях: Международная конференция “Студент и научно-технический прогресс”. Новосибирск, 16–20 апреля 2011; 15th International Conference on Transparent Optical Networks “ICTON 2011”. Stockholm, Sweden, We.C2., June 2011; 1st International Conference on Electrodynamics of complex Materials for Advanced Technologies. Samarkand, Uzbekistan, September 2011; VII международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика – 2011». Санкт-Петербург, октябрь 2011; 5th International Workshop on Electromagnetic Metamaterials. Albuquerque, USA, March 2012; 3th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics “META’12”. Paris, France, 19-22 April 2013; Всероссийская научная конференция студентов-физиков “ВНКСФ-18”. Красноярск, 29 марта - 5 апреля 2012; 4th International Conference "Smart Materials, Structures and Systems" Tuscany, Italy, June 10-14, 2012.; 8th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication "ODF ' 12," St. Petersburg, Russia, July 2 - 5th, 2012; 4th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics “META’13”. Sharjah, United Arab Emirates, 18-22 March 2013; The Interactional Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO). Russia, Moscow 18-23 June, 2013; International Conference SPIE Defense, Security, and Sensing 2013. USA, Baltimore, MD, 29 April- 3 May, 2013; Latin America Optics and Photonics Congress, Sao Sebastiao, Brazil, 10-13 November, 2012.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 4 статьи в зарубежных реферируемых изданиях и журналах списка ВАК РФ; список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора в получение научных результатов

Все основные результаты диссертации получены автором самостоятельно. Научный руководитель В.В. Слабко принимал участие в постановке задачи исследований, обсуждении полученных результатов и их интерпретации.

Объем и структура диссертации

Материалы диссертационной работы изложены на 99 страницах основного текста, рисунков 31, таблиц 1. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов, списка литературы из наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Описана структура диссертации.

Первая глава диссертации является обзорной и составляет основу для дальнейшего рассмотрения. В ней дан обзор работ посвященных как созданию сред с отрицательной дисперсией, так и исследованию их свойств. Значительное внимание уделено теоретическим работам посвященным процессам параметрического взаимодействия волн в средах с отрицательной дисперсией и описанию его основных особенностей. В частности описаны видоизмененные соотношения Мэнли-Роу и эффекты встречной волны, присущие таким средам. Показана аналогия и различия между эффектом встречной волны при параметрическом взаимодействием волн в метаматериалах.

Вторая глава посвящена рассмотрению вынужденного комбинационного рассеяния света в квазистационарном режиме, как пример параметрического взаимодействия волн с отрицательной дисперсией.

В качестве взаимодействующих волн рассматривались $E_{l,s} = 1 / 2 \varepsilon_{l,s}(z, t) e^{i k_{l,s} z - i \omega_{l,s} t} + \text{к.с.}$ - возбуждающая и стоксова электромагнитные волны, соответственно, имеющие положительную дисперсию, и волна колебательного возбуждения с отрицательной дисперсией. При условии выполнения законов сохранения $\omega_s + \omega_v = \omega_l$ и $\vec{k}_s + \vec{k}_v = \vec{k}_l$ в первом приближении теории дисперсии и

медленно меняющихся амплитуд система связанных уравнений описывающая процесс комбинационного рассеяния имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial z} + \frac{1}{v_l^{gr}} \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} = i \frac{\pi \omega_l^2}{k_l c^2} N \frac{\partial \alpha}{\partial Q} \varepsilon_s Q \\ \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} + \frac{1}{v_s^{gr}} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = i \frac{\pi \omega_s^2}{k_s c^2} N \frac{\partial \alpha}{\partial Q} \varepsilon_l Q^* \\ v_v^{gr} \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{\tau} = i \frac{1}{4 \omega_v} N \frac{\partial \alpha}{\partial Q} \varepsilon_l \varepsilon_s^* \end{cases} \quad (1)$$

где $v_{l,s,v}^{gr}$ - групповые скорости волны накачки, стоксовой волны и колебательной волны, соответственно; N - число атомов в единице объема; α - коэффициент поляризуемости молекулы; τ - время жизни фонона; ω_0 - собственная частота фонона при $k_v = 0$.

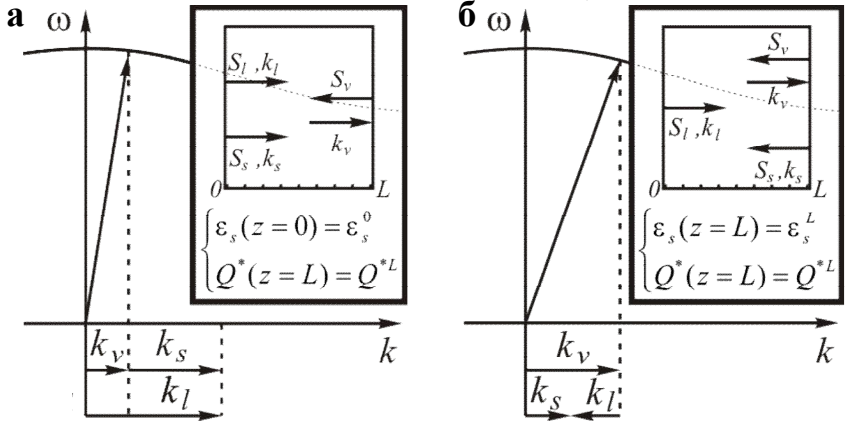


Рис.1. Дисперсионная кривая для оптического фонона и схемы реализации условий синхронизма: (а) – для попутной стоксовой волны; (б) – для встречной стоксовой волны. Во врезке: направления потоков энергии, волновых векторов и соответствующие граничные условия.

В работе рассматриваются два случая фазового синхронизма, изображенных на рис. 1, которые соответствуют попутному (1а) и встречному (1б) направлению стоксовой волны, по отношению к волне накачки. Как видно из рис. 1а в первом случае поток энергии стоксовой волны распространяется от левой границы среды к правой (рассеяние вперед). Для второго случая (см. рис. 1б) поток энергии

стоксовой волны распространяются от правой границы налево (рассеяние назад). Следует отметить, что волна колебательного возбуждения Q_v имеет противоположно направленные волновой вектор и вектор групповой скорости (поток энергии), что характерно для сред с отрицательной дисперсией. При этом в случае 1а граничные условия для $\varepsilon_{l,s}(0,t)$ соответствуют координате $z=0$, а $Q(l,t)$ - координате $z=l$. Этот случай в дальнейшем будем называть случаем встречных волн (ВВ). Для случая попутных волн (ПВ) 1б граничные условия, так же как и для 1а ясны из рис 1а и 1б, соответственно.

Коэффициенты усиления стоксовой волны на выходной границе нелинейной среды, полученные из системы уравнений (1) в квазистационарном случае, в пренебрежении истощением излучения накачки, а также в отсутствии поглощения могут быть записаны в виде:

$$T^{\uparrow\uparrow} = \left| \frac{\varepsilon_s(L)}{\varepsilon_s(0)} \right|^2 = \left| \frac{1}{\cos(gL)} \right|^2 \quad (2)$$

$$T^{\uparrow\downarrow} = \left| \frac{\varepsilon_s(0)}{\varepsilon_s(L)} \right|^2 = \left| \frac{e^{gL} + e^{-gL}}{2} \right|^2 \quad (3)$$

где $g = \frac{\pi\omega_s^2}{4k_s c^2 \omega_v} \left(N \frac{\partial \alpha}{\partial Q} \right)^2 |\varepsilon_l|^2 \tau$ - коэффициент усиления, L - длина нелинейной среды.

Наиболее интересным отличительным моментом параметрического взаимодействия для встречных волн (ВВ) является то, что при некотором значении плотности выходной мощности накачки решения обращаются в бесконечность, см. рис. 2а. Это соответствует случаю, когда знаменатель в выражении (2) обращается в 0. Этот эффект не характерен для случая встречных направлений стоксовой и лазерной волн, что может быть показано из уравнения (3), где рост эффективности преобразования является экспоненциальным.

Аналогичное (2) решение получается для сред с положительной дисперсией при ВРМБ и взаимодействии волн в средах периодически модулированной нелинейностью. Однако, основная отличительная особенность параметрического взаимодействия волн в среде с

отрицательной дисперсией и рассматриваемого здесь его аналога ВКР, заключается в том, что случай ВВ реализуется при рассеянии вперед, в то время как в средах с положительной дисперсией - назад.

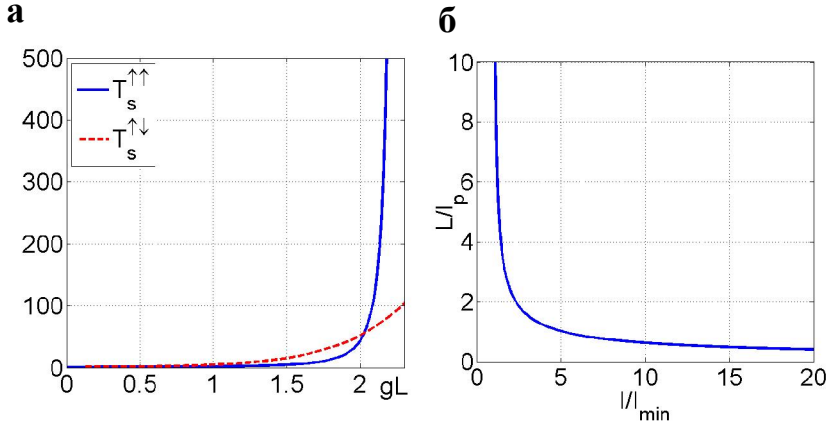


Рис.2. (а) Выходная интенсивность стоксовой волны в зависимости от интенсивности излучения накачки для ВВ и ПВ генерируемых волн. (б) Зависимость минимальной длины кристалла от минимальной требуемой накачки для реализации усиления стоксовой волны превышающего экспоненциальное, $I_{\min}$ - пороговая интенсивность накачки.

Аналогичные решения могут быть получены и для случая значительного поглощения колебательной волны, при учете времени жизни фонона τ

$$T_s^{\uparrow\uparrow} = \left| \frac{e^{z'} \{ R \cos[R(L' - z')] + \sin[R(L' - z')] \}}{R \cos[RL'] + \sin[RL']} \right|^2 \quad (4)$$

$$T_s^{\uparrow\downarrow} = \left| \left\{ \beta_1 e^{[\beta_2(L' - z')]} - \beta_2 e^{[\beta_1(L' - z')]} \right\} / R \right|^2$$

где $L' = L/l_p$, $\beta_{1,2} = 1 \mp iR$, $R = \sqrt{g_1^* g_2^* l_p^2 - 1}$, $z' = z/l_p$, $l_p = -2v_v^{gr} \tau$.

Как можно показать из уравнений (4) случай ВВ реализуется при условии когда интенсивность накачки превышает пороговое значение:

$$I_{\min} = (cn_s \lambda_{s0} \omega_v / 8\pi^3 l_p \tau) |N \partial \alpha / \partial Q|^{-2} \quad (5)$$

где λ_{s0} - длина Стоксовой волны в вакууме, n_s - показатель преломления для Стоксовой волны, ω_v - частота волны колебательного возмущения.

Используя характерные значения параметров, была получена минимальная величина интенсивности возбуждающего излучения, при которой существенны отличия взаимодействия волн с положительной и отрицательной дисперсией, $I_{\min} \sim 10^{18} \text{ Вт} / \text{см}^2$ для стационарного режима накачки, что значительно превышает пороговые значения пробоя кристаллов даже для импульсов фемтосекундной длительности. Тот факт, что пороговое значение интенсивности столь высоко, связан как со значительным затуханием волны колебательного возбуждения, так и низким значением групповой скорости фонона. Тем не менее, рассмотренный стационарный режим усиления не учитывает процессы в поле импульсного лазерного излучения, когда длительность импульса много меньше времени релаксации возбуждения, т.е. $\tau_{\text{imp}} \ll \tau$, в которых релаксацией можно пренебречь, а, следовательно, и значительно понизить значение $I_{\min}$.

Таким образом, во второй главе рассмотрен процесс комбинационного рассеяния света в качестве примера параметрического взаимодействия в средах с отрицательной дисперсией. Показан эффект значительного возрастания эффективности преобразования в таких средах, обусловленный режимом ВВ. Приведены оценки параметров для проявления указанного выше эффекта в кристалле с параметрами алмаза. Сделан вывод, что его наблюдение в стационарном режиме не представляется возможным из-за порогового значения необходимого для его проявления, которое значительно превышает пороговые интенсивности оптического пробоя для кристаллов. Предложена гипотеза о возможности наблюдения эффекта в импульсном режиме накачки.

Третья глава посвящена исследованию процесса комбинационного рассеяния света в импульсном режиме генерации аналитически, рассмотрению эффекта встречной волны в этом режиме и его сравнению со стационарным случаем.

Получить качественную картину и количественные оценки кардинального отличия импульсного режима от стационарного можно на основе простой модели. Смысл которой заключается в следующем: при отличии групповых скоростей взаимодействующих волн в приближении заданного поля накачки, взаимодействие осуществляется в каждый момент времени только в пределах импульса накачки. При переходе в систему координат, связанную с этим импульсом, и в его пределах, комплексные амплитуды двух других взаимодействующих полей не зависят от времени, и уравнения (1) переходят в систему обыкновенных дифференциальных уравнений, решение которых известно. При этом граничные условия должны выполняться не на границах среды, а на границах импульса (см. рис. 3)

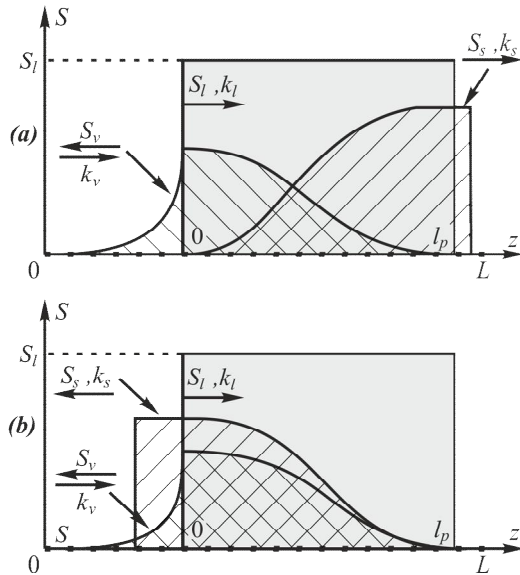


Рис. 3. Схематическое изображение распределения интенсивностей в среде в условиях принятого приближения для случая ВВ (а) и ПВ (б) волн.

Стрелками показаны направления волновых векторов k_i и потоков энергии

S_i для взаимодействующих волн.

Последнее справедливо в том случае, когда взаимодействующие волны, генерирующиеся при прохождении импульса через границу

среды, выйдут за пределы импульса, вследствие разности групповых скоростей. Критерием применимости используемого приближения является соотношение $L > L_g^{\max}$, где L - длина кристалла, а $L_g^{\max}$ - групповая длинна, равная $L_g^{\max} = \max\{L_g^s, L_g^v\}$,

$$L_g^{s,v} = \left[\tau_p \left(v_l^{gr} \right)^2 \right] / \left| v_{s,v}^{gr} \pm v_l^{gr} \right|.$$

На рис.3 показано направления волновых векторов $k_{l,s,v}$ и потоков энергии $S_{l,s,v}$ взаимодействующих полей в КР-активной среде в условиях принятого выше приближения. Здесь, для упрощения рассмотрения полагаем импульс прямоугольным. Обобщение на случай ограниченного во времени импульса любой формы не представляет трудностей.

В рамках принятого приближения рассмотрим систему уравнений (1) в движущейся системе координат связанной с импульсом накачки, с учетом разного знака v_l^{gr} и v_v^{gr} . Переходя в движущуюся систему отсчета с координатами ξ и t' используя преобразования $\xi = z - v_l^{gr} t$, $t' = t$ и приближение заданной накачки, пренебрегая временными производными, получим:

$$\begin{cases} dQ/d\xi = -ig_1 \varepsilon_s^* - Q / (\tau v_v^{gr} K_1) \\ d\varepsilon_s/d\xi = ig_2 Q^* \end{cases} \quad (7)$$

где $g_1 = -K_1 N (d\alpha/dQ) \varepsilon_l / (4\omega_v v_v^{gr})$, $g_2 = K_2 N (d\alpha/dQ) \varepsilon_l \pi \omega_s^2 / (k_s c^2)$,
 $K_{1,2} = [1 - v_l^{gr} / v_{v,s}^{gr}]^{-1}$.

Для импульсов $\tau_p \ll \tau$ поглощением можно пренебречь, тогда решение системы уравнений (4) можно записать в виде:

$$T_s^{\uparrow\downarrow} = \left| \frac{\cos[g(L' - \xi')]}{\cos(gl_p)} \right|^2 \quad (8)$$

$$T_s^{\uparrow\uparrow} = \left[\frac{e^{g(L' - \xi')} + e^{g(L' - \xi')}}{2} \right]^2$$

где $g = \sqrt{g_1^* g_2} l_p$ - коэффициент усиления; $\xi' = \xi/l_p$ - относительная координата, $l_p = -2v_v^{gr} \tau$.

Проведем сравнительный анализ минимального значения интенсивности для реализации эффекта встречной волны, полученного в главе 2 в непрерывном режиме $I_{\min}$, для той же величины в режиме импульсном режиме $I_{\min}^p$: $I_{\min}^p / I_{\min} = -K_1 / K_2$. Исходя из параметров для хорошо изученного кристалла алмаза, можно получить $I_{\min}^p / I_{\min} \approx 10^{-11}$, что будет соответствовать интенсивности накачки порядка $6 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$, вполне достижимой при фокусировке излучения коммерческого лазера, и быть ниже порога разрушения большинства кристаллов с учетом длительности импульса.

Итак, в главе 3 рассмотрен процесс комбинационного рассеяния света на оптической фононной ветви в импульсном режиме генерации. Показано, что интенсивность поля накачки, необходимая для реализации эффекта встречной волны с использованием фемтосекундных импульсов может быть получена с использованием коммерческих лазеров в импульсном режиме, и быть ниже порога разрушения большинства кристаллов. Однако, решения приведены приближении заданной накачки, в связи с чем возникает вопрос рассмотрения процесса в с учетом истощения накачки.

В **четвертой главе** численно рассматривается фотон-фононное взаимодействие в процессе комбинационного рассеяния света, в импульсном режиме накачки, в том числе для случаев со значительным её истощением.

Нами были выполнены численные расчеты процессов параметрического взаимодействия, как случае ВВ, так и ПИ при импульсном режиме накачки. Форма импульса определялась выражением

$$1/2\{\tanh[t_0 + t_{imp}]/\tau_0 - \tanh[t_0]/\tau_0\} \quad (9)$$

где t_0 - время вхождения импульса в среду, t_{imp} - длительность импульса, τ_0 - параметр характеризующий крутизну фронта импульса.

Дифференциальные уравнения (1) решались численно в три этапа: вход импульса накачки в рамановскую среду, его распространение в среде и выход из нее. При этом для входа и выхода из среды расчет производился в лабораторной системе координат. Для входа и выхода выбиралась часть среды у соответствующей границы, а граничные условия - на границах этих областей. При расчете распространения волн внутри среды в движущейся системе координат связанной с импульсом граничные условия выбирались на границах импульса. Такой способ расчета позволяет уменьшить время расчета, т.к. внутри среды расчет в каждый момент времени происходит только внутри импульса, а не по всей среде.

Одним из основных выводов, основанным на численном рассмотрении решений систем уравнений, является зависимость расстояния, на котором устанавливается стационарный режим в пределах импульса накачки от интенсивности лазерного излучения для попутного направления стоксовой и лазерной волн. При этом отмечено отсутствие таковой зависимости от интенсивности для случая встречных волн, где длина на которой устанавливается стационарный режим не зависит от интенсивности. На рис. 4 представлена зависимость нормированной длины среды $L/L_g^{\max}$ при которой устанавливается интенсивность стоксовой компоненты, составляющая величину 0.99 от её максимального асимптотического значения, в зависимости от интенсивности накачки. Из рисунка видно, что длина, как и время, установления стационарного режима стремится к бесконечности при интенсивности накачки, соответствующей $g_p^l \rightarrow \pi/2$.

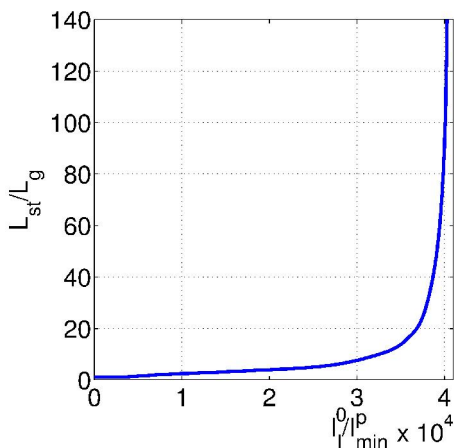


Рис. 4. Зависимость длины среды, на которой устанавливается стационарное распределение интенсивности стоксовой волны в пределах импульса накачки длительностью 60фс от интенсивности накачки. $I_{min}^p = 6 \times 10^6 \text{ Bm}/\text{см}^2$ - пороговое значение интенсивности.

Действительно, если в случае однонаправленных ПВ усиление начинается от одной из границ импульса, в которую они входят, и осуществляется локально в каждой точке до их выхода из другой границы, то для ВВ ситуация может кардинально отличаться. Амплитуда волны, входящей через задний фронт импульса, зависит от амплитуды волны, входящей через передний фронт, которая, в свою очередь будет зависеть от амплитуды первой волны, как на выходе ее через передний фронт, так и на всем протяжении импульса. Фактически, это означает возникновение распределенной обратной связи генерируемых волн, распространяющихся навстречу друг другу. Последнее может приводить к переходному режиму на длинах, значительно превышающих групповую длину.

Несмотря на то, что выбранная нами простая аналитическая модель позволяющая предсказать значительное понижение интенсивности накачки для достижения эффекта встречной волны, проведенный нами анализ показывает, что этот эффект может проявиться на длинах превышающих групповую длину. Естественным образом возникает задача о возможности наблюдения эффекта встречной волны на вполне приемлемых длинах. Как отмечалось

ранее, усиление стоксовой компоненты во встречных волнах в зависимости от интенсивности поля накачки значительно превышает экспоненциальное при достижении определенной интенсивности и длины импульса. При этом, имея целью дальнейшие экспериментальные исследования, желательно исходить из параметров генерируемого излучения, которые можно измерить в реальном эксперименте. При длительности импульсов порядка десятков фемтосекунд, измеряемым параметром является не мощность генерируемого излучения, а его энергия в импульсе, вышедшем из кристалла. На рис. 5 в логарифмическом масштабе представлена зависимость относительной энергии импульса, полученная путем численного интегрирования интенсивности излучения стоксовой компоненты на выходе из кристалла.

Расчеты выполнены для кристалла длиной 1 см, имеющего те же параметры, что и принятые для ранее выполненных оценок. Здесь

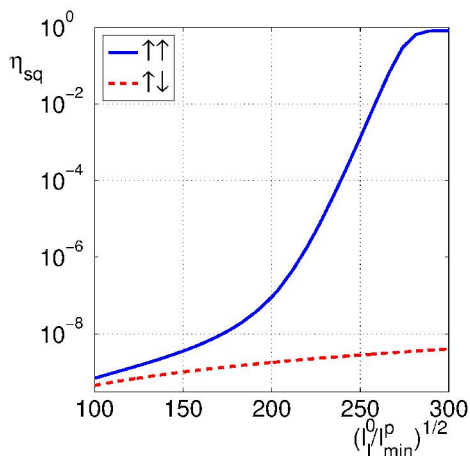
$$\eta_{sq} = \omega_l / \omega_s \cdot \int_t I_s(z=L, t) dt / \int_t I_s(z=0, t) dt \quad - \quad \text{квантовая эффективность преобразования основного излучения в излучение стоксовой волны.}$$


Рис. 5. Зависимость относительной энергии импульса стоксовой волны на выходе из среды длиной 1 см от поля накачки.

Как видно из рисунка, в пределах 100-170 нормированных единиц кривая ведет себя линейно. Это означает что в

рассматриваемом диапазоне интенсивностей зависимость близка к экспоненциальной. Далее по мере повышения интенсивности излучения накачки рост энергии выходного стоксова импульса значительно превышает экспоненциальный, как предсказано нами ранее в рамках приведенной аналитической модели.

Таким образом, показано, что интенсивность поля накачки, необходимая для реализации эффекта встречной волны с использованием фемтосекундных импульсов может быть получена с использованием коммерческих лазеров в импульсном режиме, и быть ниже порога разрушения большинства кристаллов. Кроме того, показано, что со временем в пределах импульса устанавливается стационарный режим распределения поля, при этом время его установления зависит от интенсивности накачки для случая попутных волн и не зависит в случае встречных.

Основные результаты и выводы

Основные выводы диссертационного исследования состоят в следующем:

1. Показано, что при комбинационном рассеянии света в кристаллах эффект ВВ не может наблюдаться в стационарном режиме поскольку требуемые для этого интенсивности накачки значительно превышают пороговые значения оптического пробоя кристаллов;

2. Разработана оригинальная аналитическая модель описывающая процесс ВКР в импульсном режиме генерации, на основе которой показано, что в импульсном режиме требуемая интенсивность значительно меньше порога пробоя кристаллов и легко достижима для коммерческих лазеров с импульсами фемтосекундной длительности;

3. Разработан метод численного решения нестационарных задач нелинейной оптики, в которых время прохождения импульсов через среду значительно превышает длительность импульсов. Метод позволяет значительно уменьшить время расчётов за счет перехода в движущуюся систему координат и поиска решений только в пределах импульса;

4. Получено выражение для минимального значения интенсивности накачки, необходимого для реализации эффекта встречной волны как в непрерывном, так и в импульсном режимах;

5. Показано, что характер усиления стоксовой волны в импульсном режиме может значительно превышать экспоненциальный для ВВ;

6. Длина, на которой устанавливается стационарный режим в пределах импульса значительно превышает групповую длину для случая ВВ и зависит от интенсивности поля накачки.

Публикации по теме диссертации

Основные положения диссертации представлены:

1. M.I. Shalaev, S.A. Myslivets, V.V. Slabko and A.K. Popov. Negative group velocity and three-wave mixing in dielectric crystals. // Opt. Lett., - 2011. - Vol. 36. - P. 3861–3863.

2. A.K. Popov, M.I. Shalaev, S.A. Myslivets, V.V. Slabko and I.S. Nefedov. Enhancing coherent nonlinear-optical processes in nonmagnetic backward-wave materials. // Appl. Phys. A. – 2012. - Vol. 109, Is. 4. - P. 835.

3. A.K. Popov, M.I. Shalaev, S.A. Myslivets, V.V. Slabko. Unidirectional amplification and shaping of optical pulses by three-wave mixing with negative phonons. // Appl. Phys. A. - DOI 10.1007/s00339-013-8078-4.

4. A.K. Popov, M.I. Shalaev, S.A. Myslivets, V.V. Slabko and I.S. Nefedov. Nonlinear Backward-Wave Photonic Metamaterials. // Advances in Science and Technology. - 2012. - Vol. 77. - P. 246.

5. М.И. Шалаев, Н.С. Агеенко, В.В. Слабко. Комбинационное рассеяние света как аналог нелинейного взаимодействия в средах с отрицательным показателем преломления. // Тезисы докладов международной конференции “Студент и научно-технический прогресс”. – Новосибирск. – 2011. – С. 235.

6. A.K. Popov, V.V. Slabko, S.A. Myslivets and M.I. Shalaev. Engineering localized nonlinear-optical transport with optical phonons. // Proceedings of 15th International Conference on Transparent Optical Networks “ICTON 2011”. – Stockholm, Sweden. - 2011. - We.C2.

7. A.K. Popov, M.I. Shalaev, S.A. Myslivets and V.V. Slabko. Negative-index nonlinear optics with phonons. // Proceedings of the 1st International Conference on Electrodynamics of complex Materials for Advanced Technologies “PLASMETA-2011”. - Samarkand, Uzbekistan. – 2011. -P. 44.

8. М.И. Шалаев, С.А. Мысливец, А.К. Попов, В.В. Слабко. Аналогия нелинейного взаимодействия в средах с отрицательной рефракцией и комбинационного рассеяния света в кристаллах. // Сборник трудов VII международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика – 2011”. - Санкт-Петербург. – 2011. - С. 14.
9. A.K. Popov, M.I. Shalaev, S.A. Myslivets, V.V. Slabko and I.S. Nefedov. Enhancing coherent nonlinear-optical energy exchange between ordinary and backward waves in nonmagnetic materials. // The Fifth International Workshop on Electromagnetic Metamaterials. - Albuquerque, USA. – 2011.
10. Е.В. Черных, В.В. Слабко, С.А. Мысливец и М.И. Шалаев. ВКР в кристаллах как пример параметрического взаимодействия волн в средах с отрицательной дисперсией. // Всероссийская научная конференция студентов-физиков “ВНКСФ-18”. - Красноярск. – 2012. – С. 383.
11. A.K. Popov, M.I. Shalaev, S.A. Myslivets and V.V. Slabko. Unidirectional amplification and shaping of optical pulses by three-wave mixing with negative phonons. // Proceedings of the 4th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics “META’13”. - Sharjah, United Arab Emirates. – 2013.
12. A.K. Popov, I.S. Nefedov, S.A. Myslivets, M.I. Shalaev and V.V. Slabko. Nonlinear-optical up and down frequency-converting backward-wave metasensors and metamirrors. // Proceedings of the Paper International Conference SPIE Defense, Security, and Sensing. – Baltimore, MD, USA. - 2013.
13. A.K. Popov, M.I. Shalaev, S.A. Myslivets and V.V. Slabko. Simulating NIMs with Raman Crystals. // Proceedings of the The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO). - Moscow, Russia. – 2013.

ШАЛАЕВ
Михаил
Игоревич

Комбинационное рассеяние света в кристаллах, как пример
параметрического взаимодействия волн в средах с отрицательной
дисперсией

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
кандидата
физико – математических наук

Подписано в печать 19.11.2013. Печать плоская
Формат 60x84/16 Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,2
Тираж 100 экз. Заказ № 3814

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а,
тел.: +7(391) 206-26-49, 206-26-67
E-mail: print_sfu@mail.ru