

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСИЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА В ДВУХКАСКАДНОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ УСИЛИТЕЛЕ УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

А. Е. Плохотник, И. В. Кузьмин, И. В. Мишина, Г. С. Рогожников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В современных высокоэнергетических лазерных установках наряду с прямым усилением в средах с инверсной населенностью активно применяются усилители, в основе которых лежит эффект параметрического усиления света в нелинейных кристаллах [1].

Параметрическое усиление является частным случаем трехчастотного взаимодействия волн в квадратично-нелинейной среде. При параметрическом взаимодействии часть энергии волны накачки (ω_3) передается сигнальной (ω_1) и холостой (ω_2) волнам. При этом должны выполняться следующие соотношения для взаимодействующих квантов:

$$\begin{cases} \vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 \\ \omega_1 + \omega_2 = \omega_3 \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1) первое уравнение является законом сохранения импульса, а второе – законом сохранения энергии. Первое уравнение соответствует условию фазового синхронизма для взаимодействующих волн и приводится к виду: $n_1\omega_1 + n_2\omega_2 = n_3\omega_3$.

Одной из проблем прямого усиления является высокий уровень шумов, который наблюдается в течение всего времени существования инверсной населенности, что составляет порядка 100 мкс. При параметрическом усилении взаимодействие происходит только в присутствии импульса волны накачки, которая обладает длительностью порядка 10 нс. В связи с этим параметрические усилители отличаются низким уровнем шумов и высоким контрастом излучения, что обуславливает их применение в установках с профилируемым выходным импульсом.

Моделирование усилительных процессов в многокаскадных системах и сопоставление полученных результатов с реальными выходными характеристиками излучения могут помочь при настройке и выборе оптимального режима работы для многокаскадных параметрических усилителей.

Целью данной работы являлся выбор подходящей модели для описания параметрического усиления, разработка на основе выбранной модели программного кода для расчета характеристик излучения на выходе двухкаскадного параметрического усилителя установки «Луч», анализ полученных расчетных данных и сравнение их с данными экспериментов.

Модель

В общем случае все трехчастотные взаимодействия в квадратично-нелинейной среде описываются системой уравнений для связанных амплитуд [2]:

$$\begin{cases} \widehat{M}_1 A_1 = -i\sigma_1 A_2^* A_3 e^{-i\Delta kz} \\ \widehat{M}_2 A_2 = -i\sigma_2 A_1^* A_3 e^{-i\Delta kz} \\ \widehat{M}_3 A_3 = -i\sigma_3 A_2 A_1 e^{-i\Delta kz} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь оператор \widehat{M}_i записывается как:

$$\widehat{M}_i = \frac{\partial}{\partial z} + \beta_i \frac{\partial}{\partial x} + \frac{i}{2k_i} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{u_i} \frac{\partial}{\partial t} - ig_i \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \delta_i + Q_n(A) \quad (3)$$

В уравнении (2) член с $\frac{\partial}{\partial x}$ отвечает эффекту сноса в силу анизотропии кристалла. Члены со вторыми производными по поперечной координате учитывают дифракционные эффекты, которые становятся принципиальны при рассмотрении сфокусированных пучков. Член с $\frac{\partial}{\partial t}$ связан с эффектом группового запаздывания, а член с $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$ – с дисперсионным распылением импульсов. Член $Q_n(A)$ описывает двухфотонное поглощение. δ_i отвечает линейному поглощению в среде.

Для расчетов была выбрана модель, в которой взаимодействующие волны считались плоскими и монохроматическими, а также не учитывались эффекты теплового самовоздействия света и поглощение волн в среде. В условиях данной модели система уравнений для связанных амплитуд принимает вид [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{da_1}{dz} - \sigma_1 a_2 a_3 \sin \Psi = 0 \\ \frac{da_2}{dz} - \sigma_2 a_1 a_3 \sin \Psi = 0 \\ \frac{da_3}{dz} + \sigma_3 a_1 a_2 \sin \Psi = 0 \\ \frac{d\Psi}{dz} - \Delta k + \left(\sigma_1 \frac{a_2 a_3}{a_1} + \sigma_2 \frac{a_1 a_3}{a_2} - \sigma_3 \frac{a_1 a_2}{a_3} \right) \cos \Psi = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

В системе (4) индекс 1 соответствуют сигнальной волне, 2 – холостой, 3 – волне накачки. $a_i = \sqrt{\frac{2 * I_i}{n * \epsilon_0 * c}}$ – действительные амплитуды волн; $\sigma_n = \frac{\omega_n d_{eff_n}}{n(\omega_n) c}$ – коэффициенты нелинейной связи; d_{eff} – нелинейная эффективность; $\Delta k = k_3 - k_1 - k_2$ – волновая расстройка; $\Psi = \varphi_3 - \varphi_1 - \varphi_2 - \Delta k z$ – обобщенная фаза.

Данная система укороченных уравнений использовалась в программе для расчета параметрического усиления. В качестве начальных условий задавались: $I_3(z=0) = I_{30}$; $I_1(z=0) = I_{10} \ll I_{30}$; $I_2(z=0) = 0$. При нулевой интенсивности холостой волны на входе в кристалл её фаза не определена, поэтому в качестве начальных условий для обобщенной фазы выбиралось ее устойчивое значение $\Psi(z=0) = \pi/2$.

Реализация вычислений

Данная модель была реализована в виде программы на языке C++ и позволила вести одномерный расчет параметрического усиления в каскаде усилителей на основе нелинейно-оптических кристаллов с заданными характеристиками.

Система связанных уравнений (4) решалась с помощью метода Рунге – Кутты 4-го порядка [3].

Преобразования данных внутри программы представлены на рис. 1. Для каждой пары точек (x, t) пространственного и временного распределения, из входных интенсивностей $I_{signal}(x, t, 0)$ и $I_{pump}(x, t, 0)$ рассчитываются амплитуды $A_{signal}(x, t, 0)$ и $A_{pump}(x, t, 0)$. Далее методом Рунге – Кутты 4-го порядка из системы уравнений (2) вычисляются амплитуды и затем интенсивности на длине нелинейной среды L – $I_{signal}(x, t, L)$ и $I_{pump}(x, t, L)$. Эти интенсивности интегрируются по пространству для каждой точки по времени, таким образом, получаем распределение мощности по времени. Интегрирование полученного распределения уже дает энергию сигнальной волны и волны накачки на выходе ПАУ.

Аналогично можно интегрировать временное распределение для каждой точки в пространстве. В этом случае получаем распределение плотности энергии по пространству, интегрируя которое можем получить энергию.

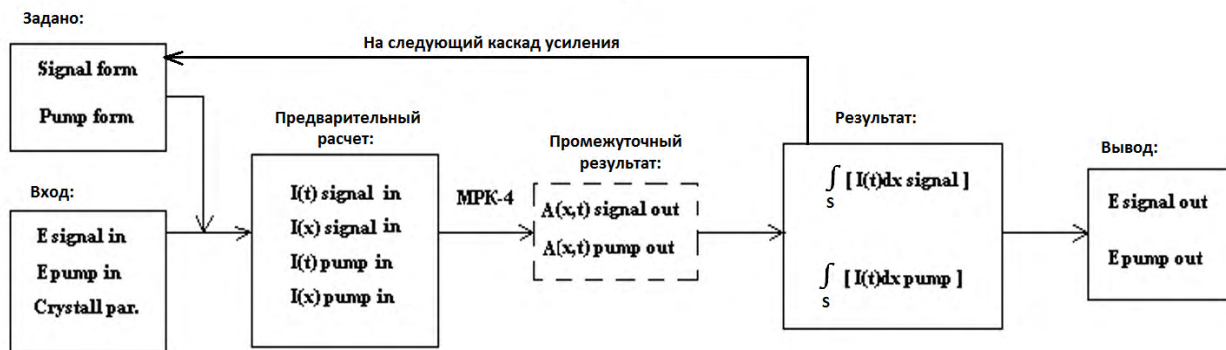


Рис. 1. Функциональная схема программы

Входными данными для программы являются пространственная и временная формы сигнального импульса и накачки, энергия и длина волны накачки и сигнала на входе; длина и количество кристаллов в ПАУ; оптические параметры кристаллов – показатели преломления, эффективная нелинейность. Выходной набор данных представляет собой значения энергии, а также плотность энергии по координате и по времени для сигнала и накачки на выходе ПАУ.

Схема установки

На рис. 2 представлена схема системы формирования опорного излучения установки «Луч», на которой производилась экспериментальная отработка созданного программного кода. Данная система состоит из задающего гетеролазера (ЗГЛ) и системы усиления, последним элементом которой является двухкаскадный параметрический усилитель.

Параметрический усилитель построен на кристаллах LBO, свойства которых подробно описаны в [4]. Первый каскад усиления состоит из двух кристаллов LBO (ПАУ-1а и ПАУ-1б) размером 8×8×30 мм, размещенных друг относительно друга таким образом, чтобы холостая волна, рождающаяся в первом кристалле, не попадала в область взаимодействия волн во втором кристалле, а сигнальная волна наоборот, не выходила из области взаимодействия. Второй каскад состоит из одного кристалла LBO (ПАУ-2) размером 8×8×30 мм.

Накачка формируется задающим генератором (ЗГ) на длине волны 1064 нм, проходит систему вырезания импульса длительностью 21 нс на базе быстродействующих ячеек Поккельса, а затем усиливается в двух двухпроходных квантронах на Nd:YAG. Далее импульс накачки попадает на кристалл LBO, где происходит ее преобразование в волну на удвоенной частоте. Излучение лазера накачки разделяется поляризационным зеркалом на пучки с горизонтальной и вертикальной поляризацией. Вертикально поляризованный пучок с энергией 20–120 мДж и размером 1,6 мм по полувысоте заводится в ПАУ-1, а после взаимодействия выводится из схемы. Горизонтально поляризованный пучок с энергией 300–700 мДж и размером 3,5 мм по полувысоте после поворота плоскости поляризации фазовой пластинкой на 90° заводится в ПАУ-2.

Сигнальная волна, излучаемая диодным гетеролазером, имеет программно-задаваемую временную форму. Сигнал усиливается в волоконном бустерном усилителе (БУ), направляется на ПАУ-1 и, после прохождения двух кристаллов, переносится телескопом на ПАУ-2. Оптический тракт параметрического усилителя развязан с волоконным бустерным усилителем при помощи ячейки Поккельса с окном пропускания $t \approx 20$ нс. Наличие этой ячейки позволяет оградить систему задающей гетеролазер – волоконный усилитель от попадания отраженного света. После прохождения ПАУ-1 сигнальная волна имеет энергию 0,2–5 мДж, а после ПАУ-2 – 10–100 мДж в зависимости от энергии накачки.

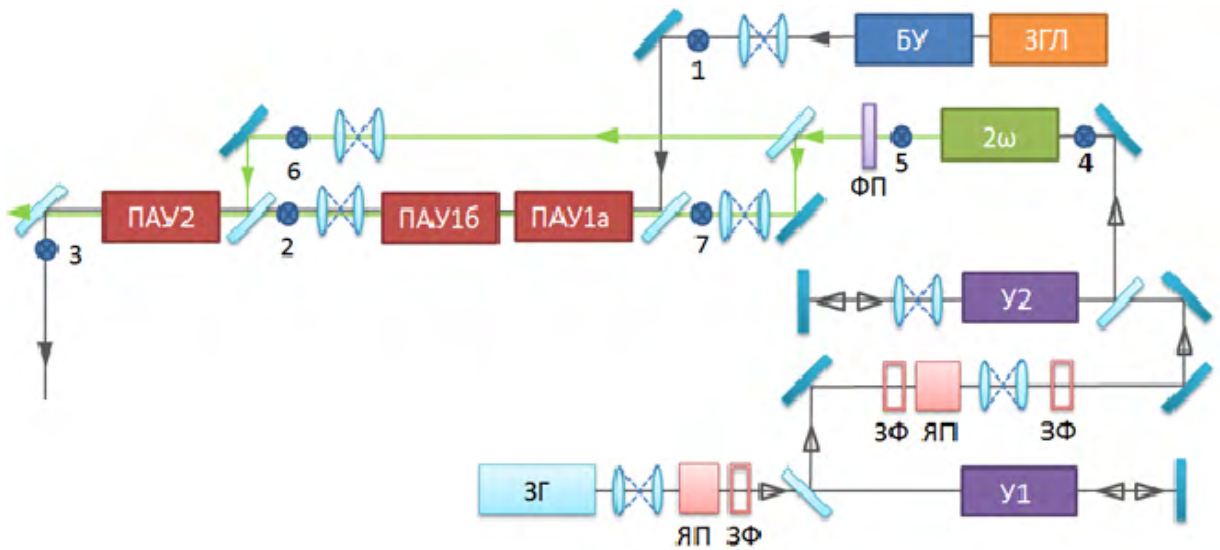


Рис. 2. Схема двухкаскадного усилителя экспериментальной установки

Пространственные формы импульсов сигнала и накачки до взаимодействия были получены на входе в ПАУ-1, в точках (1) и (7) соответственно. Входные энергии и временные формы сигнальной волны и накачки снималась на выходе ПАУ-1 (точка (2)) в отсутствие параметрического взаимодействия. То есть для измерения характеристик сигнальной волны перекрывалась волна накачки и наоборот. Этот способ помог учесть возможные потери и искажения на оптических элементах при заведении пучков в усилитель. Энергия и временная форма сигнала, усиленного в ПАУ-1 измерялись в точке (2).

Пространственные формы импульсов на входе в ПАУ-2 были получены в точках (6) (накачка) и (2) (сигнал). Энергетические и временные характеристики усиленного сигнала регистрировалась за диафрагмой после ПАУ-2, в точке (3). Наличие диафрагмы позволяет отрезать холостую волну, идущую под небольшим углом к сигнальной. Временная форма волны накачки на входе в ПАУ-2 совпадает с временной формой на входе в ПАУ-1, т.к. изначальная накачка делится на две части поляризационным зеркалом. Энергия накачки, идущая в ПАУ-2, при этом будет зависеть от доли энергии, отводимой на ПАУ-1 и вычисляется из общей энергии накачки в точке (5).

Результаты

При выполнении работы были проведены две серии экспериментов: в первой временные формы накачки и сигнала были близки к треугольным, во второй – к прямоугольным.

В ходе расчетов для ПАУ-1 временные формы импульсов считывались с сохраненных файлов осциллографа. Данные формы приведены на рис. 3 (для треугольных импульсов) и рис. 4 (для прямоугольных импульсов). Шумы, присутствующие во временной форме накачки, устранялись с помощью аппроксимации ее прямой в той области, где происходило взаимодействие.

Так как шумы пространственной формы накачки были достаточно велики, а также вследствие сложностей с разрешением камеры, пространственные распределения сигнала и накачки получались путем программного подбора формы. Пространственная форма строилась программой в зависимости от заданного на входе распределения для аппроксимации. Путем изменения параметров заданного распределения подбиралось близкое к экспериментальному значение ширины пучка при сохранении общей площади под графиком распределения (плотности энергии). Для данных серий экспериментов оптимальными оказались пространственные формы – гаусс для сигнальной волны и супергаусс 4-го порядка для волны накачки.

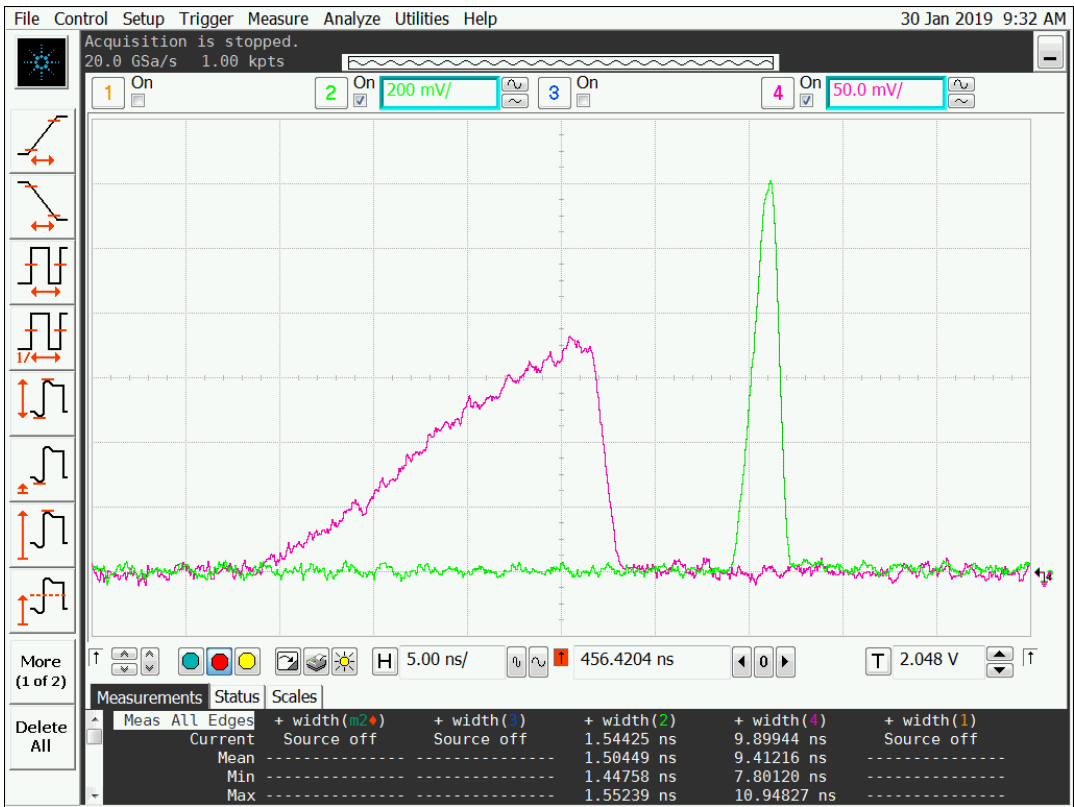


Рис. 3. Экспериментальные временные формы накачки (слева) и сигнала (справа) на входе в ПАУ-1 (треугольные импульсы)

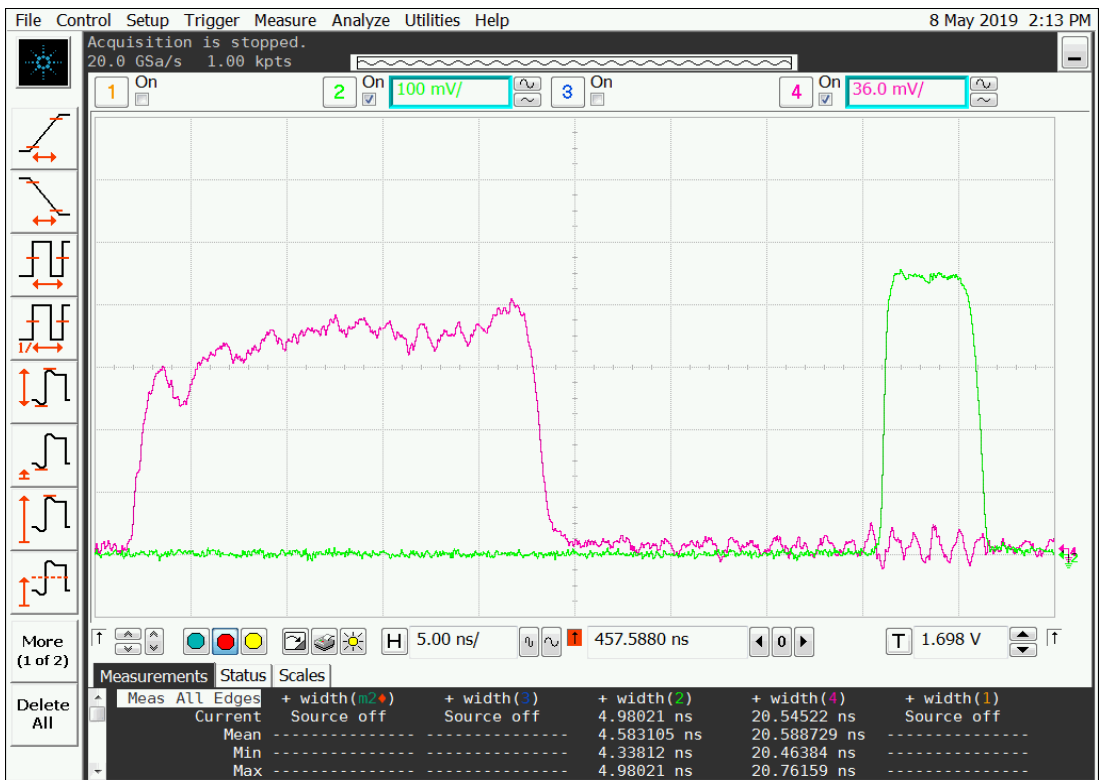


Рис. 4. Экспериментальные временные формы накачки (слева) и сигнала (справа) на входе в ПАУ-1 (прямоугольные импульсы)

В таблице 1 приведены расчетные и экспериментальные значения энергии сигнальной волны, усиленной в ПАУ-1, для различных значений энергии накачки на входе. Как можно видеть из приведенных данных, расчетные и экспериментальные энергетические характеристики сигнального излучения на выходе ПАУ-1 совпадают с точностью порядка 5–18 %. Расхождение заметно повышается с понижением входной энергии накачки. Это можно объяснить тем, что увеличивается влияние различных наводок при регистрации усиленного сигнального импульса, а также при изменении временной формы накачки на входе в усилитель.

Таблица 1

Расчетная и экспериментальная энергия сигнала на выходе ПАУ-1

Временные формы взаимодействующих волн	Энергия накачки, мДж	Экспериментальная энергия сигнала, мДж	Расчетная энергия сигнала, мДж
Треугольные	44	0,28	0,33
	65	1,3	1,4
	105	4,5	4,7
Прямоугольные	63	0,12	0,13
	86	0,52	0,56
	110	1,5	1,6

В ходе экспериментальной отработки были получены несколько значений энергии на выходе ПАУ-2 для различных распределений энергии между накачками ПАУ-1 и ПАУ-2. Результаты эксперимента, а также программные расчеты для различных временных форм взаимодействующих волн приведены в табл. 2.

Точность соответствия расчетных и экспериментальных данных для усиления в ПАУ-2 хуже, чем для ПАУ-1 и составляет 15–30 %. Ухудшающуюся точность с увеличением числа каскадов можно объяснить накоплением ошибок и ростом влияния неучтенных параметров системы.

Таблица 2

Расчетная и экспериментальная энергия сигнала на выходе ПАУ-2

Временные формы взаимодействующих волн	Энергия накачки (ПАУ-1/ПАУ-2), *10 ² мДж	Экспериментальная энергия сигнала, мДж	Расчетная энергия сигнала, мДж
Треугольные	0,7 / 4,8	33	39,5
	1,0 / 4,5	42	48,7
Прямоугольные	0,6 / 4,9	14	18
	0,9 / 4,6	24	27,1
	1,1 / 4,4	34	33,7

На рис. 5 и 6 представлены экспериментальные и расчетные временные формы сигнальной волны на выходе ПАУ-1 и ПАУ-2 соответственно для экспериментов с треугольными импульсами. Видно, что при большой энергии накачки, форма начинает изменяться – передний фронт начинает подниматься и импульс становится ближе к прямоугольному. Этот эффект связан с насыщением, которое происходит в точках пространства-времени, имеющих наибольшую интенсивность. При этом дальнейшее усиление в этих точках прекращается, а в других – продолжается, что и приводит к изменению временной формы. Данный эффект наблюдается уже при усилении в ПАУ-1 с энергией накачки 90 мДж, как можно видеть на рис. 5. В случае же с меньшими энергиями накачки в первом каскаде, процесс усиления не достигает насыщения. При этом сигнальный импульс практически не меняет временную форму даже после усиления в ПАУ-2 (рис. 6), поэтому данный режим работы является основным для опытов с регулируемой выходной формой импульсов.

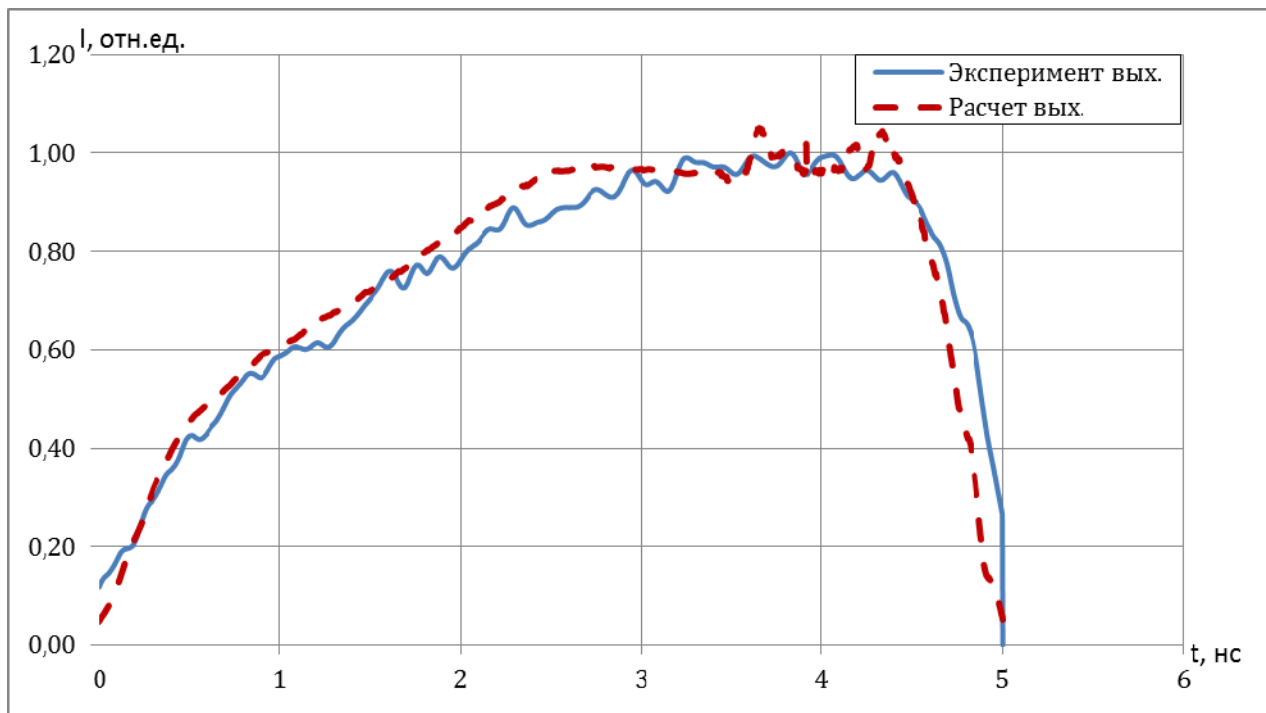


Рис. 5. Расчетная и экспериментальная временные формы сигнала на выходе ПАУ-1 для энергии накачки 90 мДж

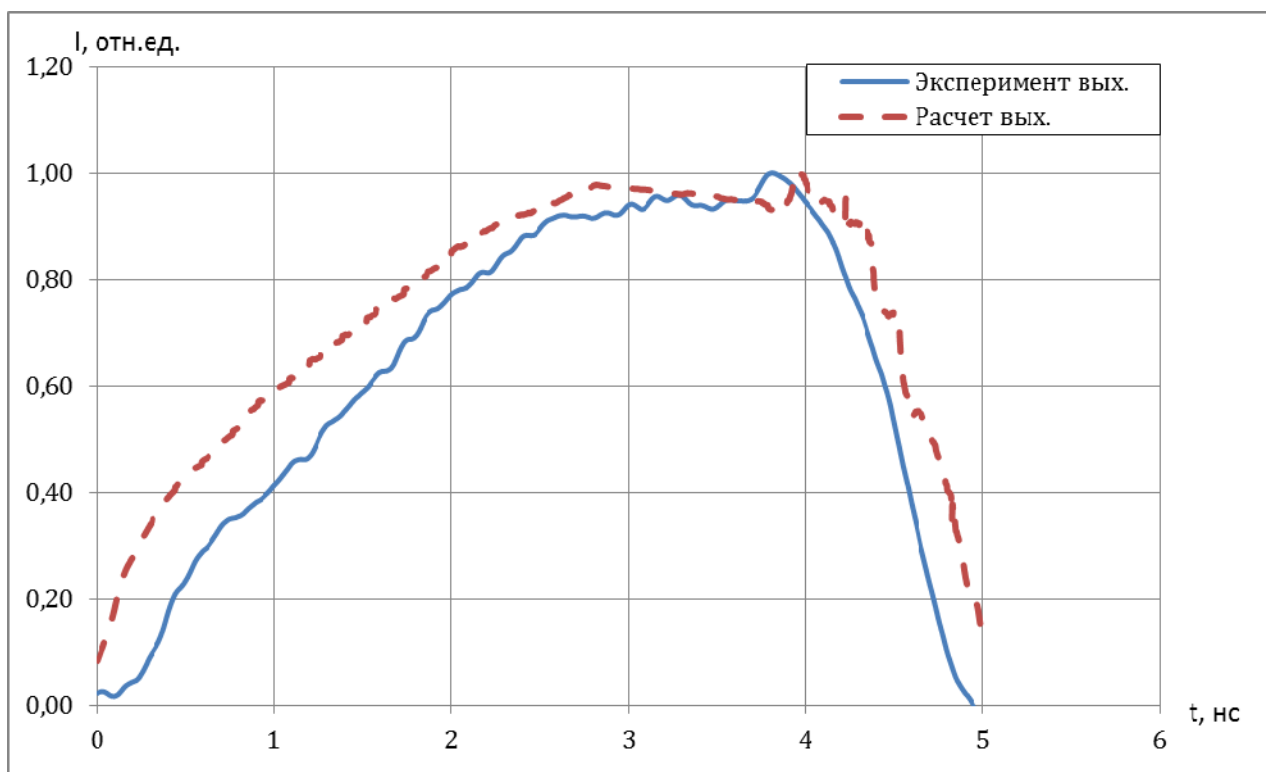


Рис. 6. Расчетная и экспериментальная временные формы сигнала на выходе ПАУ-2 для энергии накачки 50 мДж (ПАУ-1) и 550 мДж (ПАУ-2)

Заключение

На основе модели плоских монохроматических волн создан программный код для расчета процесса параметрического усиления в многокаскадных усилительных системах. При помощи созданного кода выполнены расчеты для двухкаскадного параметрического усилителя установки «Луч». Проведена экспериментальная отработка на данном усилителе, полученные данные сопоставлены с расчетами.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показал, что точность определения энергии сигнальной волны на выходе усилителя составила порядка 5–18 % для ПАУ-1 и 15–30 % для ПАУ-2. Аналогичную точность, ухудшающуюся с ростом числа каскадов, показало сравнение расчетных и экспериментальных временных профилей сигнала. Причем точность совпадения расчета и эксперимента ухудшается не только с увеличением числа рассчитываемых каскадов усиления, но и с уменьшением энергии накачки параметрического усилителя. Одним из возможных решений этой проблемы является набор статистики при снятии измерений и изменение метода аппроксимации временной формы волны накачки.

Ухудшение совпадения расчетных и экспериментальных данных с увеличением числа каскадов может быть вызвано следующими проблемами:

- ошибками при расчете, связанными с неточностями модели;
- ошибками при расчете, связанными с ограниченным шагом разбиения и накоплением ошибок;
- невозможностью одновременного измерения всех входных и выходных параметров излучения в силу особенностей строения схемы;
- нестабильностью характеристик волны накачки в эксперименте.

Дальнейшие работы в этой области предполагают улучшение точности расчетов путем решения проблем, связанных с неточностями используемой модели (увеличение числа учитываемых параметров) и самой программы (адаптация кода для расчетов). Планируется применение данной программы при настройке и выборе подходящего режима работы двухкаскадного параметрического усилителя задающего генератора установки «Луч».

Список литературы

1. Хазанов Е. А., Сергеев А. М. Петаваттные лазеры на основе оптических параметрических усилителей: состояние и перспективы // УФН, 2008. Т. 178. № 9. С. 1006–1011.
2. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. С. 512.
3. Демченко В. В. Метод Рунге – Кутты решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка: учебно-методическое пособие по курсу «Вычислительная математика». М.: МФТИ, 2004. С. 20.
4. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975. С. 256.