

Подавление пьедестала сверхкоротких импульсов при помощи нелинейного усиливающего петлевого зеркала

Ефремов Владислав Дмитриевич, аспирант, и.о. инженера-исследователя ИАиЭ СО РАН
Харенко Денис Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лаб.17 ИАиЭ СО РАН

Работа выполнена при поддержке темы госзадания ИАиЭ СО РАН (рег. No AAAA-A17-117062110026-3) и РФФИ (проект No 20-32-70093, рук. Харенко Д.С., 2019-2021 гг.).

Аннотация

Исследовались особенности прохождения ультракоротких импульсов с пьедесталом в спектральной области через волоконное нелинейное усиливающее петлевое зеркало. Построены карты максимального коэффициента пропускания, доли пьедестала в энергии импульса и изменения контраста в зависимости от длины петли и коэффициента усиления. Показано, что начальная энергия импульса, необходимая для достижения максимального коэффициента пропускания зеркала, падает ниже 1 нДж при длинах более 50 м и коэффициенте усиления более 5, а доля пьедестала может быть уменьшена с 34 до 5.6 процентов.

Постановка задачи

Амплитудная самомодуляция нелинейного усиливающего петлевого зеркала (НУПЗ) позволяет использовать его, как в качестве искусственного насыщающегося поглотителя в резонаторах с синхронизацией мод, так и для амплитудной фильтрации импульсов с одновременным их усилением. Несмотря на множество способов генерации и многообразие лазерных схем, последняя функция остаётся по-прежнему востребованной, так как не всегда удаётся получать импульсы с подходящими для дальнейшего использования параметрами. Так, например, для CARS-спектроскопии необходимы импульсы с перестраиваемым узким спектром и высокой пиковой мощностью, от чего напрямую зависит разрешающая способность конечного прибора. Один из методов получения таких импульсов заключается в пропускании сильночирпованных диссипативных солитонов через узкополосный фильтр. В реальности у импульса остаётся некоторый пьедестал в спектральной области с амплитудой порядка 1% от пиковой мощности. При последующем усилении значительная часть энергии переходит в подложку, спектр импульса расплывается, а необходимая пиковая мощность не достигается. Таким образом, существует необходимость подавить паразитное излучение для более эффективного последующего усиления.

В работе численно исследовалась возможность использования НУПЗ для задачи подавления спектрального пьедестала ультракоротких импульсов. Рассматривалась степень улучшения контраста при фиксированных длине петли и коэффициенте усиления в условиях максимального пропускания.

Численное моделирование

Основная сложность в подборе параметров НУПЗ под определённый импульс заключается в том, что оптимальная длина кольца зависит как от начальной энергии импульса, так и от коэффициента усиления. Фазовые набег излучений, распространяющихся по часовой и против часовой стрелки, можно оценить по формулам $\delta\varphi_c = n_2 g P_0 L \pi / \lambda$ и $\delta\varphi_{cc} = n_2 P_0 L \pi / \lambda$ соответственно, где n_2 – нелинейный показатель преломления пассивного волокна, g – коэффициент усиления, P_0 – пиковая мощность излучения и L – длина пассивного волокна. Однако представленные формулы не описывают, как именно НУПЗ будет влиять на пьедестал в спектральной области. Потому для оценки параметров, необходимых и для успешного подавления пьедестала, и для максимального пропускания импульса, целесообразно прибегнуть к численному моделированию.

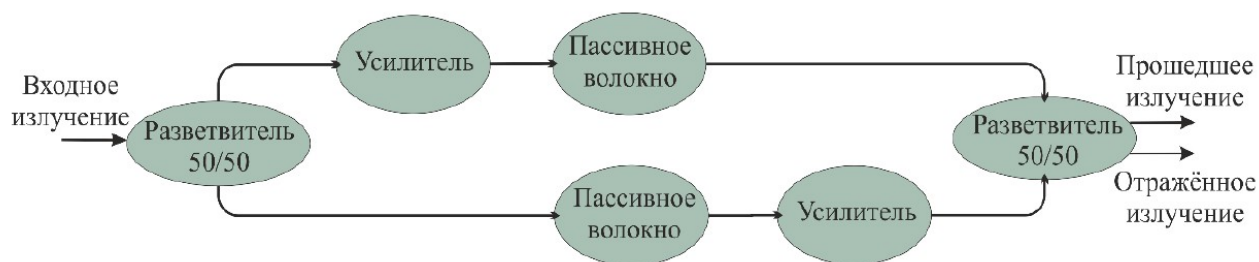


Рисунок 1. Алгоритм распространения импульса в численной модели НУПЗ

Для моделирования НУПЗ использовалась численная модель на основе нелинейного уравнения Шрёдингера:

$$\pm \frac{\partial A}{\partial z} = i\gamma |A|^2 A - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где γ и β_2 – нелинейный и дисперсионный коэффициенты соответственно; \pm относится к излучениям, распространяющимся в кольце по часовой и против часовой стрелки; $A(z, t)$ – огибающая оптического поля. В данном случае импульсы распространяются в одном волокне в разных направлениях, и, следовательно, не оказывают влияние друг на друга из-за крайне малого времени взаимодействия. Уравнения в системе (1) решаются независимо методом расщепления переменных по физическим процессам, в котором дисперсионный и нелинейный слагаемые решаются по отдельности на половине шага. Для реализации численной модели использовалась библиотека PyOFSS (Python-based optical fibre system simulator), написанная на языке программирования Python. Шаг по расстоянию варьировался от 400 до 5000 точек в зависимости от длины волокна. Временное окно составляло 4 нс с количеством точек 2^{16} . Для описания работы НУПЗ в библиотеку были добавлены такие модели элементов, как разветвитель 50/50 и несимметричный усилитель.

На рисунке 1 представлена схема численной модели НУПЗ. Разветвитель разделяет входной импульс на два с идентичной амплитудой. Усиление происходит точно по формуле $A' = g * A$, где g – фиксированный коэффициент точечного усиления. Насыщением усиления было решено пренебречь. В качестве пассивного волокна использовалось стандартное одномодовое волокно с параметрами $\gamma = 6 \text{ (Вт * км)}^{-1}$ и $\beta_2 = 22 \text{ пс}^2 * \text{км}^{-1}$.

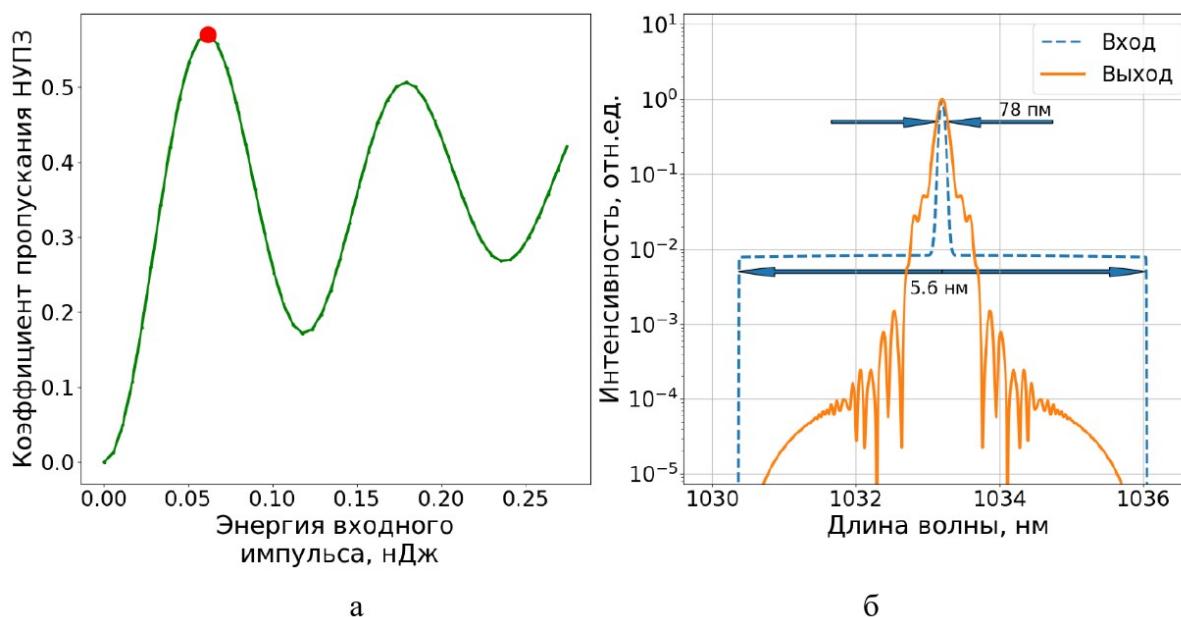


Рисунок 2. Характерная для НУПЗ зависимость коэффициента пропускания от энергии входного импульса (а) и нормированные спектры модельного импульса до и после прохождения пьедестала (б)

Основным параметром, который используется для характеристики работы конкретной схемы НУПЗ, является коэффициент пропускания $T = E_T / (E_T + E_R)$, где E_T и E_R – энергии прошедшего и отражённого импульсов соответственно. На Рисунке 2 (а) показан характерный вид зависимости коэффициента пропускания T от энергии входного импульса. Первый пик является максимально достижимым значением T , при котором наибольшая доля энергии проходит через НУПЗ. Конкретное значение T_{max} зависит от таких параметров, как L – длина пассивного волокна в кольце, g – коэффициент усиления и E_0 – энергия входного импульса.

Спектр модельного импульса до (пунктир) и после (сплошная линия) прохождения НУПЗ представлен на рисунке 2 (б). Ширина на полувысоте основной части составляет 78 пм, а пьедестала – 5.6 нм. Он содержит в себе ~34 % энергии всего импульса. Длительность составляла 20 пс. Для нашей работы важно наиболее эффективно подавить спектральный пьедестал и одновременно с этим получить наибольший выход энергии из схемы. Поэтому был произведён поиск на плоскости параметров L и g таких E_0 , при которых достигаются T_{max} . Для этого применялся следующий алгоритм. На вход в НУПЗ при некоторых фиксированных значениях L' и g' подавался импульс с фиксированной огибающей, энергия которого увеличивалась до тех пор, пока не достигался первый максимум $T_{max}(L', g')$ (см. рис. 2 (а)).

Результаты и обсуждение

Таким образом, была составлена карта максимумов коэффициента пропускания T_{max} (рис. 3, слева) и далее в работе импульсы всегда исследовались в найденных точках. Длина пассивного волокна L варьировалась от 1 м до 1 км, коэффициент усиления g – от 2 до 20. В указанном диапазоне T_{max} варьировалось от 0.57 до 0.68. На рисунке 3 справа представлены энергии входного импульса, необходимые для достижения T_{max} . Как хорошо видно, при малых длинах пассивного волокна и низком усилении требуются большие значения энергии (более 130 нДж). Однако при длинах более 50 м и коэффициенте усиления более 5 оптимальная начальная энергия падает ниже 1 нДж.

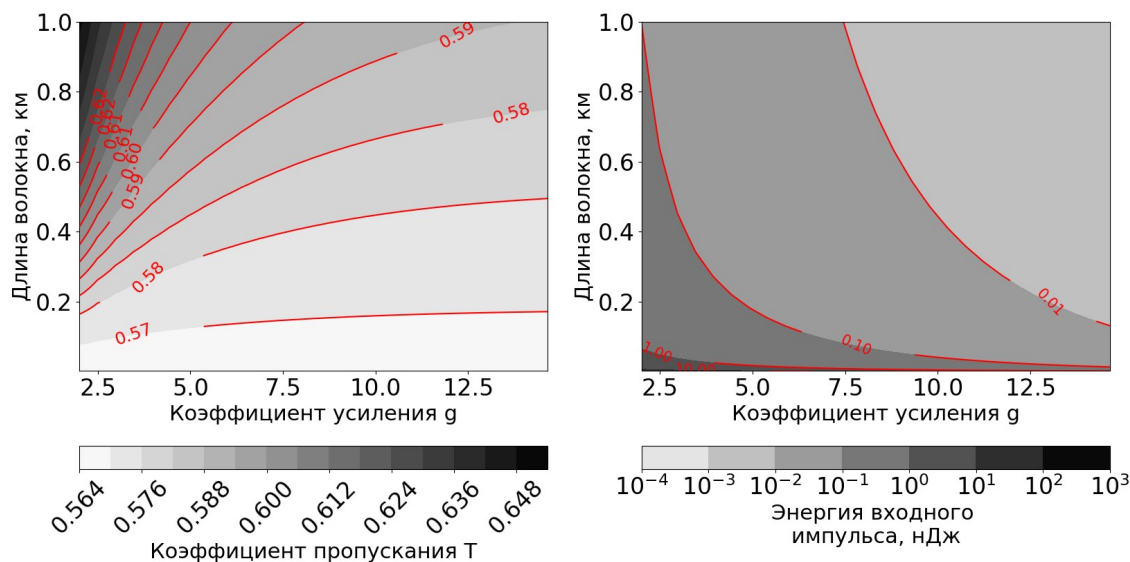


Рисунок 3. Карта максимумов коэффициент пропускания (слева) и энергия входного импульса, необходимая для достижения T_{max} (справа)

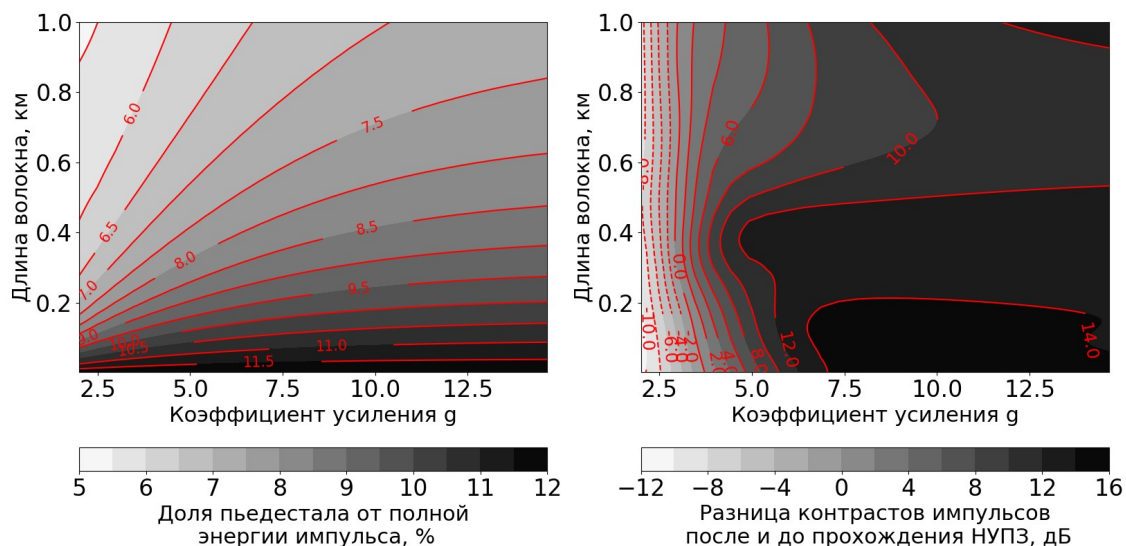


Рисунок 4. Доля пьедестала от полной энергии импульса (слева) и разница контрастов импульсов после и до прохождения НУПЗ (справа)

На рисунке 4 слева представлена доля пьедестала от полной энергии прошедшего импульса, которая находилась путём моделирования прохождения через НУПЗ импульсов с такой же шириной спектра и длительностью, но без пьедестала. Сравнение энергий на выходе позволило оценить эффективность нелинейной фильтрации. С начальных $\sim 34\%$ доля пьедестала уменьшалась до 5.6% в случае больших длин, порядка 1 км , и до 11.6% при малых длинах, порядка нескольких десятков метров. Всё это говорит о том, что пьедестал может быть эффективно подавлен при помощи НУПЗ. Однако стоит при этом рассмотреть влияние самой схемы на остальные параметры импульса. На рисунке 4 справа показана разница контрастов импульсов в спектральной области до и после прохождения НУПЗ в точках T_{max} . Контраст начального импульса составлял 20.8 дБ . Хорошо видно, что разница контрастов в основном зависит от коэффициента усиления g . Причём, при g больше 4 (в зависимости от длины волокна) контраст импульса растёт.

По представленным графикам можно сделать вывод, что наиболее перспективными параметрами НУПЗ для подавления пьедестала в спектральной области являются относительно большие длины пассивного волокна (порядка 400 метров) и коэффициент усиления больше 5 .

Эффект от использования кластера

Расчётное окно в поставленной задаче составляло 2^{16} точек а число шагов по пространству достигало 5000 . При этом для поиска максимума пропускания требовалось провести несколько итераций. Использование кластера позволило вести параллельный расчёт большого количества точек области и за короткий срок охватить широкий диапазон параметров.

Публикации:

[1] В.Д. Ефремов, А.А. Антропов, Д.С. Харенко, Подавление пьедестала сверхкоротких импульсов при помощи нелинейного усиливающего петлевого зеркала, // Прикладная фотоника т.7, №3 (2020) (в печати).

[2] В. Д. Ефремов, А. А. Антропов, Д. С. Харенко, Подавление пьедестала сверхкоротких импульсов при помощи нелинейного усиливающего петлевого зеркала // 9-й Международный семинар по волоконным лазерам: материалы семинара, 2020, сс. 201–202.