

**Тема работы:** Исследование гибридных волоконных лазеров с полупроводниковым оптическим усилителем.

**Состав коллектива:**

Художиткова Дарья Алексеевна, НГУ, младший научный сотрудник, Лаборатория технологий фотоники и машинного обучения для сенсорных систем ФФ.

Беднякова Анастасия Евгеньевна, НГУ, старший научный сотрудник, Лаборатория технологий фотоники и машинного обучения для сенсорных систем ФФ.

**Научное содержание работы:**

Постановка задачи.

Численное исследование полупроводникового оптического усилителя (ПОУ) в качестве нелинейного преобразователя излучения. Управление спектром оптических импульсов при помощи ПОУ в гибридных волоконных лазерах.

Современное состояние проблемы (на момент начала работы).

Полупроводниковый оптический усилитель - устройство на основе полупроводников, увеличивающее мощность оптического сигнала. ПОУ демонстрирует множество привлекательных характеристик, включая компактность, низкое энергопотребление и широкую полосу пропускания.

В данной работе основной акцент сделан на фундаментальных нелинейных свойствах полупроводникового усилителя, которые, как правило, считаются недостатком и нежелательной особенностью ПОУ. А именно, на возможностях нелинейного преобразования оптических импульсов в ПОУ, в том числе на смещении центральной длины волны импульсов под воздействием полупроводникового усилителя.

В этой работе предложена и продемонстрирована относительно простая альтернативная возможность достижения синего сдвига оптических импульсов путем их усиления в ПОУ. А также выполнено численное моделирование волоконного лазера на основе ПОУ с возможностью управления центральной частотой спектра.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Выполнено исследование ПОУ в качестве нелинейного преобразователя сигнала. Для этого решалась система уравнений (1)-(2). На вход в усилитель подается Гауссов импульс (3) с различными характеристиками (длительность, пиковая мощность, chirp):

$$A_{out}(t) = \exp[(1 - i\alpha_H)h(t)/2] A_{in}(t) \quad (1)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{h_0 - h}{T_{SOA}} - \frac{P_{in}(\tau)}{E_{sat}} (\exp(h) - 1) \quad (2)$$

$$A_{in}(t) = \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{1 + iC}{2} \frac{t^2}{\tau^2}\right] \quad (3)$$

Здесь  $A_{in/out}(t)$  – амплитуда электромагнитного поля,  $h(t)$  – коэффициент усиления [1]. Дифференциальное уравнение решалось методом Рунге-Кутты второго порядка.

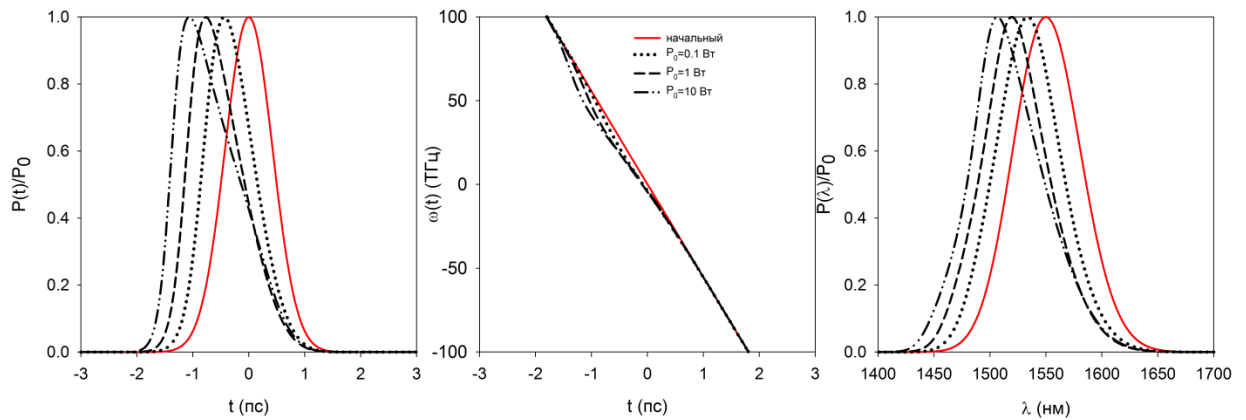


Рисунок 1. Временная форма (а), мгновенная частота (б), спектр (в). Начальный импульс - красная линия, импульсы после прохождения ПОУ - черные, для разных значений пиковой мощности при  $C=-20$ .

В результате удалось обнаружить, что полупроводниковый усилитель меняет положение спектра как в длинноволновую область [1], так и в коротковолновую. Наиболее ярко эффект сдвига в синюю область (blue shift) выражен для узких  $\sim 1$  пс и мощных импульсов с достаточно большим по модулю отрицательным чирпом ( $C < -5$ ). На рисунке 1 представлена зависимость временного профиля, мгновенной частоты и спектра от пиковой мощности начального импульса. Кроме того, на величину сдвига влияет и коэффициент усиления малого сигнала ПОУ: большее усиление приводит к большему сдвигу.

Результаты расчетов подтверждены экспериментально.

Выполнено численное моделирование гибридного волоконного лазера на основе ПОУ. Проведен поиск импульсных режимов генерации лазера. Исследована зависимость спектрального сдвига от параметров устройств лазерного резонатора.

Схема лазерного резонатора включает в себя PM DCF – волокно с нормальной дисперсией, сохраняющее состояние поляризации; ПОУ – полупроводниковый усилитель; Filter – спектральный фильтр с гауссовым профилем; ОС – ответвитель, выводящий 50% излучения из резонатора; SESAM – полупроводниковый насыщающийся поглотитель, обеспечивающий синхронизацию мод, PM DCF – стандартное одномодовое волокно с сохранением состояния поляризации, оно же используется для соединения устройств в резонаторе. Длина PM DCF фиксирована и составляет 5 метров, длина PM DCF варьировалась от 0 до 50 метров, что изменяло кумулятивную дисперсию ( $\beta_2^{cum}$ ) резонатора.

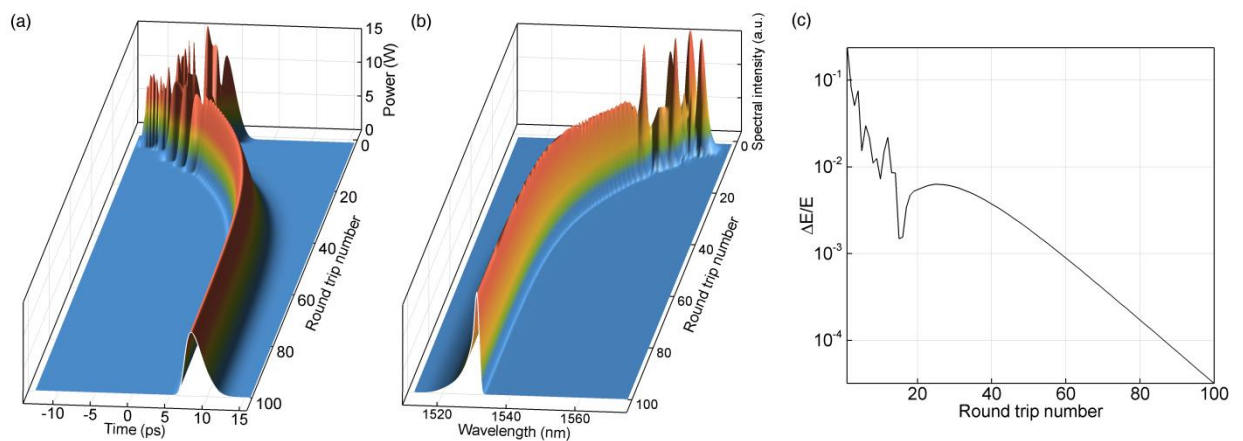


Рисунок 2. Зависимость временной (а) и спектральной (б) формы импульса от числа обходов лазерного резонатора с ПОУ и гауссовым фильтром 40 нм. (с) Сходимость изменения энергии к нулю за первых 100 обходов резонатора.

Получен устойчивый одноимпульсный режим генерации такого лазера. Установление импульса в лазерном резонаторе представлено на рисунке 2. В исследуемой области параметров (длина SMF 0 – 50 м, ширина спектрального фильтра 2 – 50 нм, центральная длина волны 1550 нм) максимальная энергия импульса достигает 18 пДж при длине SMF световода 31 м и ширине спектрального фильтра 50 нм. Показана возможность управления спектром за счет изменения ширины спектральных фильтров. Так для лазера 35-метровым участком SMF волокна максимальное смещение 4.6 нм в длинноволновую область достигается с 7-нанометровым фильтров, в коротковолновую область смещение достигает 10 нм при использовании фильтра 50 нм. Наибольший спектральный сдвиг как в красную, так и в синюю области достигается при включении в схему широкого 50-нанометрового фильтра. В данном случае центральная длина волны изменяется от 1529.5 нм (50 м SMF) до 1591.6 (24 м SMF).

#### Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Для осуществления целей работы были использованы вычислительные ресурсы ИВЦ НГУ. Так как гибридный волоконный лазер с полупроводниковым оптическим усилителем - сложная многопараметрическая система, для его исследования и оптимизации требуется достаточно много вычислительных ресурсов, недоступных на обычных ПК.

#### Грантовая поддержка

Работа выполнена при поддержке Российского Научного фонда (грант № 21-42-04401).

#### Литература.

[1] G. P. Agrawal and N. A. Olsson, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989

## **Публикации:**

### Статьи

[Nonlinear spectral blueshift in semiconductor optical amplifiers](#)

[Bednyakova, A. E., Khudozhitkova, D., Kokhanovskiy, A. & Turitsyn, S. K.](#), 1 окт. 2021, В: [Optics Letters](#). 46, 19, стр. 4757-4760 4 стр.

[New regimes of pulse evolution in a fiber laser with semiconductor optical amplifier](#)

[Khudozhitkova, D., Bednyakova, A., Kokhanovskiy, A. & Turitsyn, S. K.](#), 2022, 2022 *International Conference Laser Optics, ICLO 2022 - Proceedings*. [Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.](#), 1 стр. (2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022 - Proceedings).

### Тезисы

[Nonlinear spectrum transformation in semiconductor optical amplifiers](#)

[Bednyakova, A., Khudozhitkova, D., Kokhanovskiy, A. & Turitsyn, S. K.](#), 2021, *Laser Science, LS 2021*. [Optica Publishing Group \(formerly OSA\)](#), JTU1A.97. (Optics InfoBase Conference Papers).

[Nonlinear spectral tunability of pulsed fiber laser with semiconductor optical amplifier](#)

[Bednyakova, A., Khudozhitkova, D. & Turitsyn, S.](#), дек. 2022, В: [Scientific Reports](#). 12, 1, 13799.