

**КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ЛАЗЕРЕ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД****Журавлев Г.С. (ИТМО), Викторов Е.А. (ИТМО), Ковалев А.В. (ИТМО)  
Научный руководитель – к. ф.-м. н., профессор Викторов Е.А. (ИТМО)**

**Введение.** Эффект синхронизации мод позволяет стабильно генерировать последовательности импульсов и гребенки оптических частот. Особенности синхронизации мод в полупроводниковых лазерах представляют широкий академический интерес. Динамический режим, реализуемый благодаря этому эффекту востребован в спектроскопии, дальнометрии, телекоммуникациях. Определение спектральной фазы и фазовых соотношений между модами оптической частотной гребенки является нетривиальной задачей. Анализу фазовых соотношений в полупроводниковом лазере с синхронизацией мод и эффекту кластеризации межмодовых разностей фаз в оптической гребенке посвящена данная работа.

**Основная часть.** Исследуемое устройство – полупроводниковый лазер в двухсекционном исполнении (с секциями усиления и быстрого насыщающегося поглотителя). Инструментом изучения эффекта синхронизации мод в таких лазерных диодах служит система дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом относительно комплексной амплитуды поля на выходе из резонатора (кольцевой или линейной конфигурации), насыщающихся усиления и поглощения в соответствующих секциях. Система получена упрощением более общей системы дифференциальных уравнений в частных производных [1]. Параметры включают ширину внутрирезонаторного фильтра (принимаемого лоренцевым), аттенюацию поля на обход (количество энергии, остающейся в резонаторе после генерации импульса), факторы уширения спектральной линии в обеих секциях (альфа-факторы), параметр накачки, ненасыщенное поглощение, времена релаксации полупроводникового материала в режимах усиления и поглощения и отношение интенсивности поля в секциях. Система нормирована на время обхода резонатора, задержка установлена равной одному обходу.

В ходе работы исследованы динамические режимы, устанавливающиеся в системе с различными факторами уширения спектральной линии при пассивной и гибридной (с приложением амплитудно-модулированного радиочастотного сигнала к секции поглотителя [2]) синхронизации. Предметом исследования являлись разности фаз между соседними модами, полученные с использованием алгоритма коррекции спектра [3]. При анализе результирующих распределений разностей фаз по частотам обнаружен эффект кластеризации, при котором разность фаз между модами оптической гребенки может быть описана сигмоидной функцией. Максимум производной сигмоидной функции соответствует центру оптического спектра, а две ветви сигмоиды соответствуют постоянным значениям разностей фаз для низко- и высокочастотной частей спектра. Различие постоянных значений разностей фаз объясняет асимметрию профиля импульсов интенсивности излучения лазера. Эффект наблюдается как при пассивной, так и при гибридной синхронизации мод и обусловлен ненулевыми факторами уширения спектральной линии.

Наблюдение кластеризации дополняет теоретические представления о фазах синхронизированных мод, а также объясняет ранее опубликованные экспериментальные данные с асимметрией формы импульса [4].

**Выводы.** Проведен анализ фазовых соотношений полупроводникового лазера с синхронизацией мод. Обнаружен эффект кластеризации межмодовых разностей фаз, наблюдающийся при пассивной и гибридной синхронизации, обусловленный ненулевыми факторами уширения спектральной линии и объясняющий асимметрию формы импульса.

**Список использованных источников:**

1. Vladimirov A.G., Turaev D. Model for passive mode locking in semiconductor lasers // *Physical Review A*. 2005. Т 3. № 72. С. 033808.
2. Arkhipov R. [и др.]. Hybrid mode locking in semiconductor lasers: Simulations, analysis, and experiments // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2013. Т. 4. № 19. С. 1100208–1100208.
3. Xiangdong Huang [и др.]. A novel high-accuracy digitalized measuring phase method // *2008 9th International Conference on Signal Processing*. 2008.
4. Raghunathan R. [и др.]. Pulse characterization of passively mode-locked quantum-dot lasers using a delay differential equation model seeded with measured parameters // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2013. Т. 4. № 19. С. 1100311–1100311.