

Синхронизация мод в лазере с когерентным поглотителем

М. В. Архипов⁺¹⁾, Р. М. Архипов^{+*×1)}, А. А. Шимко⁺, И. Бабушкин^{°1)}

⁺ Физический факультет, С.-Петербургский государственный университет, 198504 Старый Петергоф, Россия

^{*} Weierstrass Institute, 10117 Berlin, Germany

[×] Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, 12489 Berlin, Germany

[°] Institute of Quantum Optics, Leibniz University Hannover, 30167 Hannover, Germany

Поступила в редакцию 17 декабря 2014 г.

В работе экспериментально рассматривается синхронизация мод в непрерывном узкополосном перестраиваемом лазере на красителе, в резонаторе которого размещены поглощающие ячейки с парами молекулярного йода. При настройке длины волны излучения лазера на красителе на линии поглощения паров молекулярного йода во внутрирезонаторной ячейке временной ход генерации приобретает вид коротких импульсов, следующих с периодом, равным или кратным времени обхода светом резонатора. При этом длительность импульсов генерации составила около 1 нс, что значительно меньше времени фазовой памяти в парах йода. В такой ситуации синхронизация мод возникает в условиях и за счет когерентного характера взаимодействия лазерного излучения с узкими резонансами поглощения в парах молекулярного йода.

DOI: 10.7868/S0370274X15040049

1. Введение. Лазеры с пассивной синхронизацией мод являются источниками ультракоротких импульсов (УКИ) с высокой частотой повторения и находят многочисленные применения в науке и технике [1–7]. Такие лазеры содержат ячейку с насыщающимся поглотителем, который служит нелинейным модулятором потерь. В настоящее время данный подход, использующий насыщение поглощения в поглотителе и насыщение усиления в усиливающей среде, используется во всех типах двухсекционных лазеров, работающих в режиме пассивной синхронизации мод. Однако он позволяет генерировать УКИ, длительность которых ограничена обратной спектральной шириной профиля усиления и поглощения внутрирезонаторных сред. В последнее время появились теоретические работы, посвященные новому типу синхронизации мод – когерентной синхронизации мод (КСМ). В них теоретически исследуется возможность возникновения КСМ в лазерах за счет когерентного характера взаимодействия света с веществом поглотителя [8, 9], а также усилителя и поглотителя [10–15]. Отметим, что особенности когерентного взаимодействия света с поглощающими и усиливающими средами известны давно (см., например, [16–19]). В теоретических работах [10–15]

показано, что режим КСМ возникает за счет формирования 2π -импульса самоиндуцированной прозрачности (СИП) для поглощающей среды и π -импульса для усиливающей среды, когда вещества усилителя и поглотителя перемешаны в объеме, и для возникновения генерации необходима дополнительная инжекция короткого импульса от внешнего лазера. В наших работах [20, 21] была впервые продемонстрирована возможность КСМ в двухсекционном лазере, когда усиливающая и поглощающая среды разнесены в пространстве. Данный режим является самостартующим, инжекции затравочного импульса не требуется. Подход к генерации УКИ на основе КСМ с практической точки зрения интересен тем, что длительность импульса генерации τ_p меньше времени фазовой памяти внутрирезонаторных сред T_2 . Поэтому ширина полосы усиления и поглощения перестает быть лимитирующим фактором для длительности генерируемых импульсов. Однако несмотря на существование теоретических работ по КСМ, до сих пор не известно ни одной экспериментальной демонстрации эффекта КСМ в лазерах. В настоящей работе мы делаем важный шаг на пути к практической реализации КСМ, показывая экспериментально возможность генерации коротких импульсов в режиме синхронизации мод в лазере с поглотителем, длительность которых меньше времени фазовой релаксации в поглотителе.

¹⁾ e-mail: arkhipm@mail.wplus.net; arkhipov@wias-berlin.de; babushkin@iqo.uni-hannover.de

Синхронизация мод наблюдалась нами в непрерывном перестраиваемом узкополосном лазере на красителе с помещенными в резонатор лазера в качестве поглотителя резонансно поглощающими парами молекулярного йода I_2 . Режим синхронизации мод в генерации лазера возникал, когда узкая линия генерации лазера настраивалась на линии поглощения ячеек с парами молекул йода, и исчезал, когда частоту генерации лазера отстраивали от частоты перехода. Режим синхронизации мод наблюдался нами на нескольких переходах молекулы йода I_2 , попадавших в область перестройки длины волны излучения лазера.

2. Описание установки и результаты экспериментов. В экспериментах по наблюдению возникновения режима синхронизации мод был использован непрерывный перестраиваемый лазер T&D scan laser system (производство компании Техноскан, г. Новосибирск, РФ). Лазер работал на растворе родамина 6Ж и имел длину резонатора 97 см. Режим узкополосной генерации обеспечивали два селектора: широкополосный селектор фильтр Лио (ФЛ) и узкополосный селектор интерферометр Фабри-Перо (ИФП). Источником накачки красителя служил стабилизированный одночастотный лазер компании Coherent Inc. (модель Verdi V10).

Регистрация длины волны излучения осуществлялась при помощи блока контроля спектра, который входил в состав перестраиваемого лазера на красителе. Временные характеристики излучения регистрировались при помощи скоростного фотоприемника 11HSP-V2 и цифрового запоминающего осциллографа Agilent DSO9104A. Это обеспечивало временное разрешение около 300 пс и возможность запоминать данные на интервалах времени до 2 мс со скоростью записи данных 20 гигаэмпллов в секунду. В качестве резонансного когерентного поглотителя брались две стандартные ячейки с парами молекулярного йода, которые до этого использовались в резонаторах стабилизированных гелий-неоновых лазеров. Ячейки можно было одновременно и порознь расположить в резонаторе перестраиваемого лазера.

Выбор паров молекулярного йода при комнатной температуре в качестве “когерентного” поглотителя в наших экспериментах не случаен. Это классический объект для наблюдения когерентного взаимодействия в видимом диапазоне длин волн (см., например, работы по наблюдению фотонного эха, переходных нутаций и затухания свободной поляризации в наносекундном диапазоне длительностей, где время жизни возбужденных состояний переходов составляет около 1 мкс, а времена фазовой памяти T_2

равны десяткам и сотням наносекунд [22–26]). Кажущимся на первый взгляд недостатком молекулярного йода является высокая плотность расположения линий поглощения в области генерации лазера на родамине 6Ж. Однако это дало нам возможность наблюдать эффект синхронизации мод на разных линиях поглощения, которые попадали в область перестройки лазера.

Эксперименты проводились следующим образом. В резонаторе лазера располагались ячейки с йодом. Из резонатора лазера удалялся ИФП, и при помощи перестройки ФЛ определялись области длин волн, на которых в спектре генерации лазера отчетливо наблюдались провалы, связанные с внутрирезонаторным поглощением паров молекулярного йода в ячейке. Настройка на линии поглощения также сопровождалась интенсивной люминесценцией вдоль лазерного пучка в ячейках. После нахождения областей поглощения в резонаторе вновь размещали ИФП и, меняя его наклон, настраивали длину волны генерации в ту область длин волн, которая по показаниям блока измерения должна была соответствовать настройке на поглощение в ячейках. При мощности лазера накачки от 8 до 10 Вт “попадание” на линию поглощения сопровождалось интенсивной люминесценцией вдоль лазерного пучка в ячейке с молекулярным йодом и появлением модуляции на осциллограммах интенсивности генерации лазера на красителе с характерным временем обхода резонатора. Это однозначно говорит о возникновении режима синхронизации мод в лазере под влиянием поглощения в ячейке. На рис. 1а представлена осциллограмма генерации лазера с ФЛ и ИФП без ячеек при развертке 200 мкс/дел и показаниях измерителя длины волны 585.181 нм. Постоянная интенсивность сигнала с фотоприемника наблюдалась во всей области перестройки лазера при отсутствии ячеек в его резонаторе. На рис. 1б дана осциллограмма при тех же показаниях измерителя длины волны, но с ячейкой с парами йода в резонаторе лазера. В таком случае генерация сопровождается глубокой модуляцией излучения в течение времени не менее 2 мс.

Вид импульсов генерации в этом случае показан на рис. 2а. Они следуют с периодом около 6.5 нс, который соответствует времени двойного прохода светом длины резонатора. Эффект синхронизации мод возникал и в других областях поглощения. При этом вид импульсов, возникавших в режиме синхронизации, был различен для разных участков спектра, где было зарегистрировано поглощение в ячейках. На рис. 2б и с приведены примеры импульсов при других показаниях измерителя длин волн. И наконец,

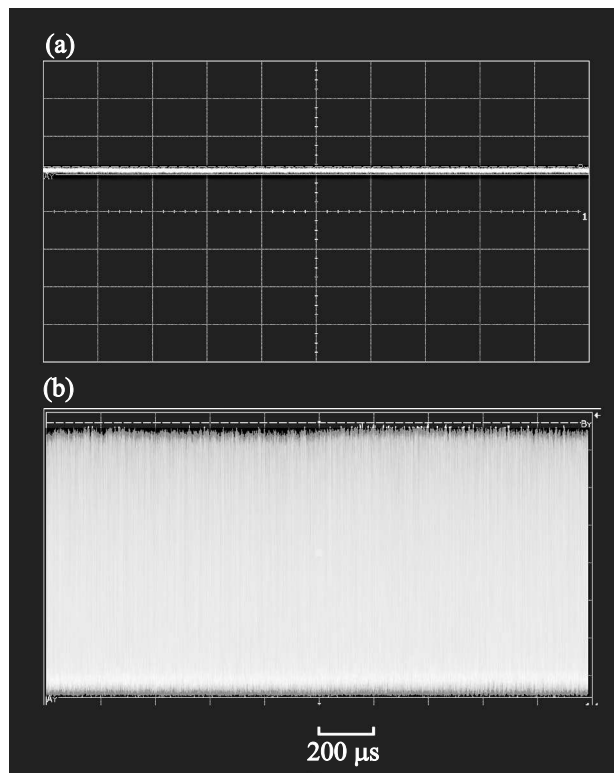


Рис. 1. Осциллограммы временного хода интенсивности генерации при развертке 200 мкс на деление в отсутствие в резонаторе лазера паров молекулярного йода (а) и при их наличии (б). Показания измерителя длин волн 585.181 нм. На этом и последующих рисунках длины волн указаны в вакууме и приводятся картины экранов цифрового осциллографа

когда частота лазера попадала в “окно” прозрачности между областями поглощения (пример такой осциллограммы приведен на рис. 2d), модуляция излучения отсутствовала, интенсивность излучения была постоянной.

3. Обсуждение и выводы. На представленных примерах отчетливо видно, что при настройке на линии поглощения молекулярного йода лазер начинает работать в режиме синхронизации мод, который длится не менее 2 мс и в течение этого времени генерирует импульсы, следующие с периодом обхода резонатора.

Обнаруженный эффект может быть объяснен когерентным характером взаимодействия лазерного излучения с парами молекулярного йода. Дело в том, что наблюдаемые в эксперименте длительности импульсов генерации (порядка нс) значительно меньше времени релаксации поляризации йода T_2 (сотни нс). В этом случае, как мы считаем, эффект синхронизации мод возможен только в режиме когерентного

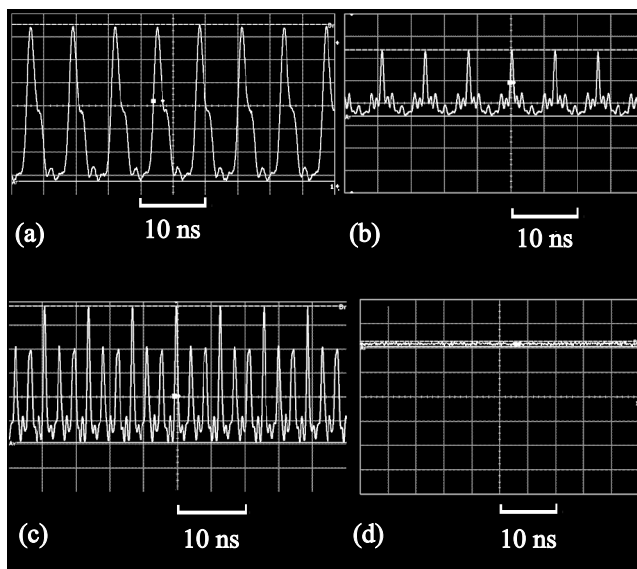


Рис. 2. Осциллограммы интенсивности генерации при развертке 5 нс на деление на разных длинах волн при наличии ячеек с парами молекулярного йода в резонаторе. Показания измерителя длин волн при регистрации осциллограмм: 585.181 нм (а); 585.220 нм (б); 590.155 нм (с); 585.188 нм (д)

взаимодействия света с веществом. Данный режим существенно отличается от просветления среды при обычном насыщении поглощения, которое реализуется при $\tau_p > T_2$ (см. обзоры [17, 18]), когда способность среды поглощать или излучать энергию просто пропорциональна разности населенностей верхнего и нижнего уровней. Такой импульс не сможет перевести среду в инвертированное состояние, а его взаимодействие с ней приводит к уравниванию населенностей верхнего и нижнего уровней. Энергия импульса уходит на просветление среды и уже не может когерентно вернуться назад. Совершенно иная ситуация возникает при когерентном взаимодействии импульса с резонансно поглощающей средой, когда длительность импульса меньше T_2 . Энергия, забираемая частицами поглощающей среды из излучения, может вернуться обратно в излучение за счет существования поляризации, наведенной проходящим импульсом. Запасенная в среде поглотителя энергия переходит в поле излучения среды, а затем снова возвращается в среду.

Такой процесс периодического обмена энергией между полем и веществом, если он происходит в резонаторе лазера, может приводить к периодической модуляции интенсивности лазерного излучения [8]. При этом наведенная при поглощении поляризация излучает в противофазе по отношению к па-

дающему импульсу (эффект так называемого когерентного звона среды, *coherent optical ringing* [27–29]). Это является причиной, например, возникновения характерного хвоста на заднем фронте импульса (см. рис. 2b).

Таким образом, в настоящей работе впервые экспериментально продемонстрирована возможность практической реализации режима синхронизации мод в лазере, в котором, как мы считаем, ключевую роль играет когерентный механизм взаимодействия света с веществом поглотителя.

Авторы признательны к.ф.-м.н. И. А. Чехонину (физ. факультет СПбГУ) за полезные обсуждения. Р.А. выражает благодарность за финансовую поддержку EU FP7 ITN ПРОФЕТ (Grant # 264687). Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ “Оптические и лазерные методы исследования вещества” (Scientific research were performed at the Center for Optical and Laser Materials Research of Research park of St.Petersburg State University).

1. P. G. Kryukov, Квант. электрон. **31**, 95 (2001) [Quant. Electron. **31**, 95 (2001)].
2. U. Keller, Nature **424**, 831 (2003).
3. C. Rulliere, *Femtosecond Laser Pulses*, Springer Science+ Business Media, Inc. (2005).
4. E. U. Rafailov, M. A. Cataluna, and W. Sibett, Nat. Phot. **1**, 395 (2007).
5. E. U. Rafailov, M. A. Cataluna, and E. A. Avrutin, *Ultrafast Lasers Based on Quantum Dot Structures*, WILEY-VCH (2011).
6. D. Arsenijević, M. Kleinert, and D. Bimberg, IEEE Photon. J. **6**, 0700306 (2013).
7. P. G. Kryukov, УФН **183**, 897 (2013) [Phys. Usp. **56**, 849 (2013)].
8. V. S. Egorov and I. A. Chekhonin, Опт. и Спектр. **80**, 664 (1986) [Opt. and Spectr. **60**, 405 (1986)].
9. V. P. Kalosha, M. Müller, and J. Herrmann, J. Opt. Soc. Am. B **16**, 323 (1999).
10. V. V. Kozlov and E. E. Fradkin, ZhETF **107**, 360 (1995).
11. V. V. Kozlov, Phys. Rev. A **56**, 1607 (1997).
12. C. Menyuk and M. A. Talukder, Phys. Rev. Lett. **102**, 23903 (2009).
13. C. Menyuk and M. A. Talukder, Phys. Rev. A **79**, 063841 (2009).
14. V. V. Kozlov, N. N. Rosanov, and S. Wabnitz, Phys. Rev. A **84**, 053810 (2011).
15. V. V. Kozlov and N. N. Rosanov, Опт. и Спектр. **114**, 870 (2013) [Opt. and Spectr. **114**, 798 (2013)].
16. S. L. McCall and E. L. Hahn, Phys. Rev. **183**, 457 (1969).
17. P. G. Kryukov and V. S. Letokhov, УФН **99**, 169 (1969) [Sov. Phys. Usp. **12**, 641 (1970)].
18. I. A. Poluektov, Yu. M. Popov, and V. S. Roitberg, УФН **114**, 97 (1974) [Sov. Phys. Usp. **18**, 673 (1975)].
19. L. Allen and J. H. Eberly, *Optical Resonance and Two-level Atoms*, Wiley (1975).
20. R. Arkhipov, M. Arkhipov, and I. Babushkin, eprint arXiv:1410.6667 (2014) [WIAS Preprints # 2019, 2030 (2014)].
21. Р. М. Архипов, М. В. Архипов, И. В. Бабушкин, Письма в ЖЭТФ **101**(3), 164, (2015) [R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, and I. Babushkin, JETP Lett. **101**(3), (2015)].
22. T. E. Orlovsky, *New techniques in coherent optical spectroscopy: optical dephasing and radiationless processes in molecules*, Thesis Ph.D., California Institute of Technology Pasadena, California (1979).
23. H. Nakatsuka, S. Asaka, M. Tomita, and M. Matsuoka, Opt. Comm. **47**, 65 (1983).
24. I. I. Popov, M. V. Lelekov, A. N. Leukhin, I. S. Bikbov, and V. V. Samartsev, Laser Phys. **7**, 271 (1997).
25. G. A. Capelle and H. P. Broida, J. Chem. Phys. **58**, 4212 (1973).
26. P. F. Williams, L. Rousseau, and S. H. Dworketsky, Phys. Rev. Lett. **32**, 196 (1974).
27. M. D. Crisp, Phys. Rev. A **1**, 1604 (1970).
28. J. E. Rothenberg, D. Grischkowsky, and A. C. Balant, Phys. Rev. Lett. **53**, 552 (1984).
29. M. V. Arkhipov, R. M. Arkhipov, and S. A. Pulkin, Опт. и Спектр. **114**, 912 (2013) [Opt. and Spectr. **114**, 831 (2013)].