Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 10, с. 657 – 661

Синхронизация мод в титан-сапфировом лазере за счет когерентного поглотителя

М. В. Архипов[a,b 1)], *Р. М. Архипов*[a,b,f], *А. А. Шимко*[a], *И. Бабушкин*[c,d], *Н. Н. Розанов*[b,e,f]

[a] *Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 С.-Петербург, Россия*

[b] *Университет ИТМО, 197101 С.-Петербург, Россия*

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

[d] *Max Born Institute, 10117 Berlin, Germany*

[e] *Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, 199053 С.-Петербург, Россия*

[f] *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021 С.-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 4 апреля 2019 г.
После переработки 4 апреля 2019 г.
Принята к публикации 5 апреля 2019 г.

Экспериментально продемонстрирован режим пассивной синхронизации мод в титан-сапфировом лазере с когерентным поглотителем, с генерацией импульсов с длительностью, значительно короче времен релаксации в поглотителе. Роль когерентного поглотителя выполняли пары рубидия, ячейка с которым помещалась в резонаторе лазера. Синхронизация мод возникала при настройке частоты генерации в область резонансных переходов рубидия. По нашему мнению, в резонаторе возникали 2π-импульсы самоиндуцированной прозрачности, и данные эксперименты являются первой экспериментальной демонстрацией, до сих пор обсуждавшейся только теоретически, пассивной синхронизации мод за счет использования эффекта самоиндуцированной прозрачности.

DOI: 10.1134/S0370274X19100035

Введение. Режим пассивной синхронизации мод в лазерах возникает, когда в резонаторе размещают, помимо усиливающей среды, поглощающую, имеющую нелинейную зависимость пропускания от интенсивности, например, при насыщении поглощения [1–3]. Явление насыщения поглощения, одновременно с насыщением усиления в усилителе, и создает условия для появления режима синхронизации мод без активного внешнего воздействия на параметры резонатора, что находит широкое применение в лазерах [2, 3]. Заметим, что явление насыщения носит резонансный характер и восстановление поглощения после очередного импульса требует времени. В таких лазерах минимальная длительность импульса ограничена временем релаксации T_2 среды. Для получения очень коротких импульсов нужны "быстрые" нелинейности, например, практически безынерционная керровская электрооптическая нелинейность. В прозрачной среде за счет крайне быстрого изменения показателя преломления, зависящего от квадрата напряженности электрического поля, происходит частичная самофокусировка пучка, при этом снижаются потери для мощных и коротких импульсов излучения, и возникает режим пассивной синхронизации мод ("*Kerr lens mode-locking*") [2, 4].

Заметим, что резонансные поглотители, если они действуют в режиме когерентного взаимодействия света с веществом, также могут быть использованы для создания режима пассивной синхронизации мод [5–15]. При этом времена релаксации среды не будут накладывать ограничения на длительность импульса генерации, которая, в принципе, может достигать значения в один цикл световых колебаний [9, 10]. Когерентное взаимодействие света с веществом возникает, когда длительность лазерного импульса меньше времени релаксации разности населенностей T_1 и поляризации T_2 [16, 17]. При этом импульс в резонансно-поглощающей среде может распространяться без потерь, как 2π-импульс самоиндуцированной прозрачности (СИП) [18, 19]. Режим пассивной синхронизации мод, возникающий за счет явления СИП, принято называть когерентной синхронизацией мод (КСМ) [5, 8–14]. Еще раз подчеркнем, что данный тип синхронизации мод возникает за счет явления СИП, ко-

1) e-mail: m.arkhipov@spbu.ru

гда взаимодействие импульса с поглощающей средой когерентное, это существенно отличает КСМ от лазерных систем, работающих в режиме стандартной пассивной синхронизации мод, оперирующих в режиме некогерентного насыщения поглощения [8–14]. И хотя такой режим КСМ достаточно давно теоретически анализируется разными авторами [5–11, 13, 14], экспериментально он не был продемонстрирован. Используя резонансный когерентный поглотитель, авторам [12, 15], по их мнению, удалось получить синхронизацию мод в режиме генерации так называемых импульсов нулевой площади (0π-импульсов) [20]. В таких импульсах происходит смена знака огибающей поля, поэтому генерация имеет вид двух связанных друг с другом импульсов, медленно меняющих свои амплитуды [15]. Получить синхронизацию мод за счет возникновения в поглощающей среде 2π-импульса СИП экспериментально не удавалось. Впервые реализовать СИП в ячейке с парами рубидия внутри резонатора удалось в работе [21]. Для этого в титан-сапфировом лазере с ячейкой с парами изотопа рубидия при помощи полупроводникового просветляющегося поглотителя SESAM (SEmiconductor Saturable Absorber Mirror) с насыщающимся поглощением возбуждали режим пассивной синхронизации мод. Настраивая длину волны генерации имевшимся внутри резонатора спектральным селектором на резонансный переход в парах рубидия, авторы [21] наблюдали увеличение длительности импульса, снижение стабильности генерации и увеличение периода следования импульсов при увеличении концентрации паров рубидия во внутрирезонаторной ячейке. Авторы указанной работы приводят расчеты и оценки, говорящие, по их мнению, в пользу возникновения режима СИП на резонансных переходах рубидия. При этом они не сообщают, удалось ли им получить режим СИП без создания насыщающимся элементом SESAM режима синхронизации мод. Таким образом осталось неясно, может ли ячейка с парами рубидия, переходы в котором обладают большим временем релаксации T_2, являться причиной синхронизации мод, и будут ли возникающие при этом импульсы импульсами СИП. В данной работе на установке с титан-сапфировым лазером с ячейкой с парами рубидия в его резонаторе экспериментально продемонстрировано возникновение самостартующего режима пассивной синхронизации мод, возникающего только за счет эффекта СИП в парах рубидия.

Описание экспериментальной установки. Экспериментальная установка показана на рис. 1. Титан-сапфировый лазер был собран на оптической

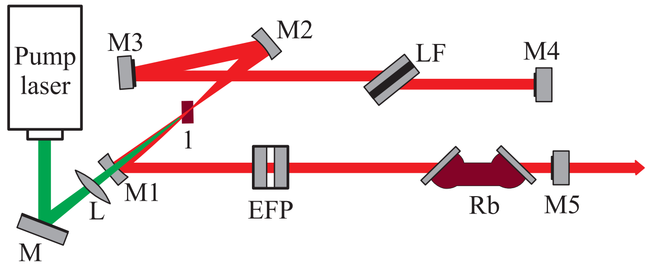

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема титан-сапфирового лазера с ячейкой в резонаторе, содержащей пары рубидия. 1 – кристалл титан-сапфира; M1, 2 – сферические зеркала, M3 – вспомогательное зеркало, M4, 5 – полностью отражающее и выходное зеркала резонатора с пропусканием около 8 %, M – зеркало в канале накачки, L – фокусирующая излучение накачки линза, LF – фильтр Лио, EFP – эталон Фабри–Перо

плите из комплекта стандартных деталей лазера компании ТЕХНОСКАН, см. рис. 1. Перестройка длины волны генерации осуществлялась фильтром Лио LF. Также дополнительно в резонатор лазера для большего сужения линии генерации можно было ввести интерферометр Фабри–Перо EFP. Излучение лазера накачки VERDI V10 (Coherent) при помощи зеркала M и линзы L фокусировалось в кристалл титан-сапфира 1. Ячейка с парами рубидия (естественная смесь изотопов) располагалась перед выходным зеркалом резонатора M5. Окошки ячейки ориентированы под углом Брюстера для минимизации потерь. Длина ячейки 8 см. Ячейку можно было вносить и удалять из резонатора, нагревать и охлаждать. Зависимость интенсивности излучения лазера от времени регистрировалась при помощи скоростного фотодиода и осциллографа DSO 9104A (Agilent Technologies), длина волны излучения определялась спектрометром, мощность генерации лазера контролировалась измерителем мощности МАЭСТРО (Standa).

Экспериментальные результаты. При помещении ячейки с парами рубидия в резонатор лазера и настройке длины волны генерации в область резонансного поглощения паров Rb в титан-сапфировом лазере возникал режим синхронизации мод, который сопровождался люминесценцией в ячейке. На рисунке 2 приведены осциллограммы импульсов.

Синхронизация мод возникала при использовании для перестройки длины волны лазера фильтра Лио как без эталона, так и совместно с ним. При охлаждении ячейки с помощью смоченной жидким азотом ваты режим синхронизации мод пропадал. По мере испарения азота и нагреве ячейки до комнатной температуры 24 °C режим синхронизации вос-

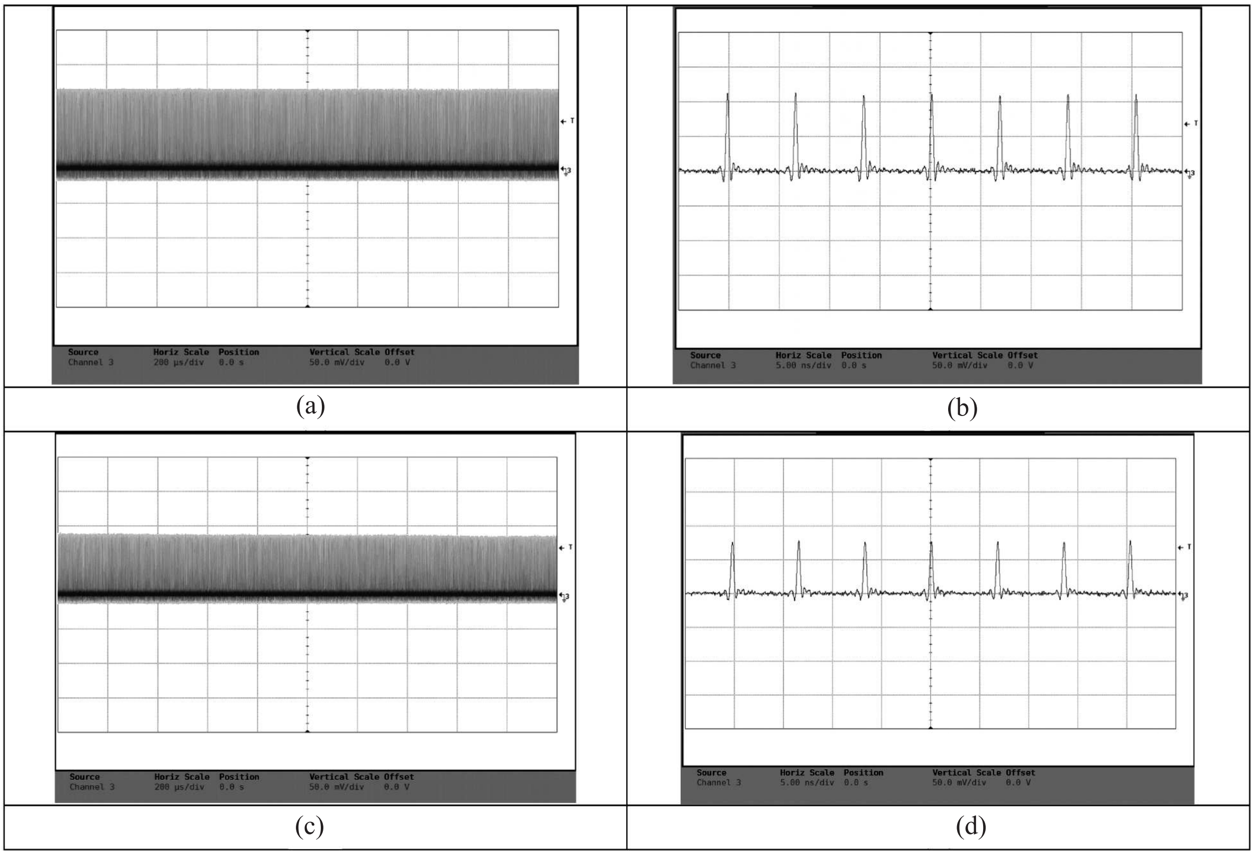

Рис. 2. Осциллограммы импульсов генерации титан-сапфирового лазера с ячейкой, содержащей пары рубидия при температуре 24 °C. На осциллограммах (a) и (b) длина волны генерации лазера настроена на линию DII 780 нм, а на (c) и (d) – на линию DI 795 нм. На рисунках (a) и (c) временная развертка по горизонтальной оси составляет 200 мкс/деление, на (b) и (d) – 5 нс/деление

станавливался. Также осуществлялся нагрев ячейки от 24 °C до температуры 70 °C. При этом режим синхронизации мод сохранялся. Следует отметить, что синхронизация мод стартовала автоматически в случае настройки длины волны генерации на линии поглощения рубидия. Никаких дополнительных воздействий не требовалось. Режим синхронизации сохранялся длительное время (измеряемое десятками минут), хотя специальных мер для стабилизации резонатора в экспериментальной установке не применялось. Известно, что титан-сапфировый лазер может действовать в режиме самосинхронизации мод за счет нелинейной керровской линзы в активном элементе. За счет внешнего воздействия кратковременную синхронизацию в течение десятка микросекунд удавалось получить при значительно больших мощностях генерации 0.4–0.8 Вт при удалении из резонатора ячейки с рубидием и селектирующих элементов. В наших экспериментах максимальная выходная мощность не превышала 0.15 Вт, мощность внутри резонатора была также невелика. При этом режим самосинхронизации мод на длинах волн вне линий поглощения рубидия не наблюдался при использовании таких приемов воздействия на установку, как возбуждение механическим ударом колебаний зеркал и плиты, на которой был собран резонатор, установка диафрагм. Пары рубидия в таких условиях не могли спровоцировать самосинхронизацию мод за счет керровской нелинейности. Учитывая, что в условиях проведенных экспериментов время $T_2 = 2T_1$, где $T_1 = 27$ нс [21, 22], а длительность импульса генерации меньше этого значения, взаимодействие излучения с переходами в парах рубидия носит когерентный характер. Режим генерации одиночных импульсов говорит в пользу того, что эти импульсы должны быть импульсами СИП: сначала импульс возбуждает поглощающую среду, а затем энергия от среды возвращается обратно в импульс. После прохождения импульса среда должна остаться в исходном невозбужденном состоянии, потери энергии минимальны. Если в резонаторе реализуется режим СИП, то площадь огибающей импульса составит 2π и не будет меняться при изменении энергии импульса. Это значит,что с ростом выходной мощности генерации длительность импульса будет сокращаться.

Выведем соотношение для оценки длительности импульса от выходной мощности генерации. Длительность должна соответствовать периоду Раби $T_{\rm Rabi} = \frac{2\pi}{\Omega_{\rm Rabi}}$. В выражение для частоты Раби $\Omega_{\rm Rabi} = \frac{d_{12}E}{h}$ входят значение напряженности поля E, d_{12} – дипольный момент перехода в рубидии 7.5 Дебая [22] и $\hbar$ – приведенная постоянная Планка. Напряженность электрического поля можно выразить через значение плотности мощности в импульсе W. В единицах СГСЭ они связаны соотношением $E(\text{СГСЭ}) = 27\sqrt{(W\left(\frac{\text{вт}}{\text{см}^2}\right)}/300$ [23]. Величину W находим по формуле $W = \frac{P_{\rm out}T_{cav}}{T_r\tau\cdot\pi(D/2)^2}$, где $P_{\rm out}$ – измеряемая мощность, T_r – пропускание выходного зеркала резонатора, T_{cav} – время двойного обхода импульсом линейного резонатора, τ – длительность импульса, D – диаметр пучка в резонаторе рядом с ячейкой. Для последующей оценки предположим, что импульс имеет прямоугольную форму, тогда $\tau = T_{\rm Rabi}$. Это позволяет нам выразить длительность импульса τ через измеряемую мощность:

$$\tau = \left(\frac{22\cdot\pi\cdot h}{d_{12}}\right)^2 \cdot \frac{T_r\cdot\pi\cdot\left(\frac{D}{2}\right)^2}{T_{cav}} \cdot \frac{1}{P_{\rm out}}. \qquad (1)$$

Согласно приведенному выражению, длительность импульса СИП меняется обратно пропорционально выходной мощности $P_{\rm out}$.

На рисунке 3 приведено сравнение длительности импульсов τ, вычисленных по формуле (1), с экспериментальными результатами. Минимальная длительность импульсов генерации 80 пс была получена при выходной мощности 0.094 Вт и измерена при помощи интерферометрического автокоррелятора. Получено хорошее совпадение теоретической оценки и измеренной в эксперименте длительности импульсов.

Заключение. Совокупность экспериментальных результатов и сделанных оценок позволяет сделать вывод о наблюдении в данных экспериментах режима синхронизации мод за счет формирования в парах рубидия импульсов самоиндуцированной прозрачности. В лазере не было условий для самосинхронизации мод за счет режима насыщающегося поглотителя, так как длительности импульсов были значительно меньше времени релаксации T_2. Длительности импульсов соответствовали импульсам с площадью 2π.

Таким образом, в данной работе, насколько нам известно, впервые экспериментально продемонстрирован режим пассивной синхронизации мод не за счет насыщения поглощения, а за счет когерентного поглотителя, в котором формируются импульсы самоиндуцированной прозрачности. Этот режим перспективен для генерации предельно коротких лазерных импульсов.

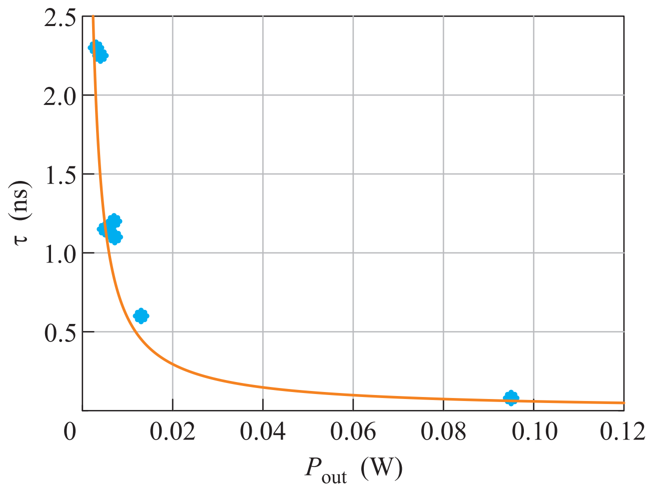

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимость длительности импульсов генерации от выходной мощности. Точки – измеренная длительность импульсов генерации, сплошная линия – расчет по формуле (1)

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра “Оптические и лазерные методы исследования вещества” Научного парка Санкт-Петербургского Государственного Университета.

Данное исследование входит в план работ заявки на грант РНФ # 19-72-00012.

1. H. A. Haus, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. **6**, 1173 (2000).
2. J. C. Diels and W. Rudolph, *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*, Elsevier (2006).
3. U. Keller, Appl. Phys. B **100**, 15 (2010).
4. U. Morgner, F. X. Kartner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi, Opt. Lett. **24**, 411 (1999).
5. V. V. Kozlov, Phys. Rev. A **56**, 1607 (1997).
6. V. P. Kalosha, M. Muller, and J. Herrmann, Opt. Lett. **23**(2), 11 (1998).
7. V. P. Kalosha, M. Muller, and J. Herrmann, J. Opt. Soc. Am. B **16**, 323 (1999).
8. C. Menyuk and M. A. Talukder, Phys. Rev. A **79**, 063841 (2009).
9. V. V. Kozlov, N. N. Rosanov, and S. Wabnitz, Phys. Rev. A **84**, 053810 (2011).

10. V. V. Kozlov and N. N. Rosanov, Phys. Rev. A **87**(4), 043836 (2013).
11. Р. М. Архипов, М. В. Архипов, И. В. Бабушкин, Письма в ЖЭТФ **101**, 164 (2015) [R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, and I. V. Babushkin, JETP Lett. **101**, 149 (2015)].
12. М. В. Архипов, Р. М. Архипов, А. А. Шимко, И. В. Бабушкин, Письма в ЖЭТФ **101**, 250 (2015) [M. V. Arkhipov, R. M. Arkhipov, A. A. Shimko, and I. Babushkin, JETP Lett. **101**, 232 (2015)].
13. R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, and I. Babushkin, Opt. Comm. **361**, 73 (2016).
14. R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, I. Babushkin, and N. N. Rosanov, Opt. Lett. **41**, 737 (2016).
15. M. V. Arkhipov, A. A. Shimko, R. M. Arkhipov, I. Babushkin, A. A. Kalinichev, A. Demircan, U. Morgner, and N. N. Rosanov, Laser Phys. Lett. **15**(7), 075003 (2018).
16. П. Г. Крюков, В. С. Летохов, УФН **99**, 169 (1969) [P. G. Kryukov and V. S. Letokhov, Sov. Phys. Usp. **12**, 641 (1970)].
17. Л. Аллен, Дж. Эберли, *Оптический резонанс и двухуровневые атомы*, Мир, М. (1978) [L. Allen and J. H. Eberly, *Optical resonance and two-level atoms*, Wiley, N.Y. (1975)].
18. S. L. McCall and E. L. Hahn, Phys. Rev. **183**, 457 (1969).
19. И. А. Полуэтков, Ю. М. Попов, В. С. Ройтберг, УФН **114**, 97 (1974) [I. A. Poluektov, Yu. M. Popov, and V. S. Roitberg, Sov. Phys. Usp. **18**, 673 (1975)].
20. J. E. Rothenberg, D. Grischkowsky, and A. C. Balant, Phys. Rev. Lett. **53**, 552 (1984).
21. K. Masuda, C. Affolderbach, G. Mileti, J. C. Diels ,and L. Arissian, Opt. Lett. **40**(9), 2146 (2015).
22. D. A. Steck, http://steck.us/alkalidata (revision 2.1.1) (2009).
23. Н. В. Карлов, *Лекции по квантовой электронике*, Наука, М. (1983), с. 23.