

## ЗАХВАТ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА ЛИНИЯМИ РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ЯЧЕЙКИ С ПАРАМИ ЦЕЗИЯ, РАЗМЕЩЕННЫМИ В РЕЗОНАТОРЕ

М. В. Архипов<sup>1</sup>, А. А. Шимко<sup>1</sup>, Р. М. Архипов<sup>1,2</sup>, Н. Н. Розанов<sup>1,2\*</sup>

УДК 621.375.826:546.36

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-2-149-155>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

e-mail: [m.arkhipov@spbu.ru](mailto:m.arkhipov@spbu.ru), [shim\\_ko@mail.ru](mailto:shim_ko@mail.ru), [arkhipovrostislav@gmail.com](mailto:arkhipovrostislav@gmail.com), [nnrosanov@mail.ru](mailto:nnrosanov@mail.ru)

<sup>2</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

(Поступила 10 февраля 2023)

Приведены результаты экспериментов по наблюдению захвата частоты на резонансных переходах в парах цезия, ячейка с которыми помещена в резонатор титан-сапфирового лазера. При перестройке частоты излучения титан-сапфирового лазера в окрестности ДИИ линии поглощения Cs 820 нм продемонстрирована одновременная генерация на линии поглощения в режиме когерентной синхронизации мод и генерация на частоте, задаваемой спектральным селектором. При этом пассивные потери в резонаторе на частоте генерации, задаваемой селектором, меньше, чем потери на частоте перехода в цезии. Результат обсуждается с точки зрения особенности воздействия внутрирезонаторного узкополосного поглощения на спектры генерации широкополосных лазеров и эффекта “конденсации” спектра.

**Ключевые слова:** синхронизация мод, когерентная синхронизация мод, самоиндуцированная прозрачность, захват частоты, конденсация спектра.

*The paper presents the results of experiments on the observation of frequency locking by cesium vapor resonant transition, which was placed in the cavity of a titanium-sapphire laser. The radiation frequency of a titanium-sapphire laser was tuned near the ДИИ absorption line of Cs 852 nm. In this case, the simultaneous generation on the absorption line in the coherent mode locking regime and generation at the frequency specified by the spectral selector were demonstrated. Passive losses of the laser cavity on the selector frequency are less than the losses on the frequency of absorption transition of Cs. This unusual result is discussed from the point of view of the effect of intracavity narrow-band absorption on the emission spectra of broadband lasers and the effect of spectrum “condensation”.*

**Keywords:** mode-locking, coherent mode locking, self-induced transparency, frequency locking, spectrum condensation.

**Введение.** С момента появления первых лазеров непрерывно проводился поиск новых активных лазерных сред и способов управления спектральными и временными параметрами излучения лазеров. Прорывом стало появление лазеров на растворах органических красителей с широкой полосой усиления в результате работы трех групп: Шефера и Шмидта (Марбург, ФРГ), Сорокина и Ланкарда (лаборатория IBM, США) и академика Б. И. Степанова (Институт физики АН БССР) [1]. Как отмечается в обзоре [2], посвященном истории создания лазеров на органических соединениях, причиной успеха группы физиков под руководством Б. И. Степанова был подход, который “заключался в со-

---

## FREQUENCY LOCKING OF THE TITANIUM-SAPPHIRE LASER BY RESONANT ABSORPTION LINES OF A CESIUM VAPOR CELL IN A CAVITY

M. V. Arkhipov<sup>1</sup>, A. A. Shimko<sup>1</sup>, R. M. Arkhipov<sup>1,2</sup>, N. N. Rozanov<sup>1,2\*</sup> (<sup>1</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; e-mail: [m.arkhipov@spbu.ru](mailto:m.arkhipov@spbu.ru), [shim\\_ko@mail.ru](mailto:shim_ko@mail.ru), [arkhipovrostislav@gmail.com](mailto:arkhipovrostislav@gmail.com), [nnrosanov@mail.ru](mailto:nnrosanov@mail.ru); <sup>2</sup> Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia)

здании фундаментальной квантово-механической теории процессов в возбужденном состоянии для сложных молекул, позволившей теоретически предсказать результат будущего эксперимента”.

Лазеры на красителях нашли применение во внутрирезонаторной абсорбционной лазерной спектроскопии [3]. В спектрах широкополосного излучения лазеров на красителях можно наблюдать узкие участки, в которых интенсивность излучения мала или отсутствует. Подобные “провалы” связаны с присутствием в резонаторе веществ, частоты поглощения которых попадают в область широкополосного спектра генерации. В элементарной теории [4, 5], объясняющей это явление, селективные потери на частотах поглощения учитывались как наличие потерь, превышающих средний уровень и ведущих к медленному затуханию излучения на частотах поглощения.

В некоторых случаях размещение поглощающих веществ (паров щелочных металлов, атомарных газов в газовом разряде) приводит к необычным результатам. В спектре генерации вблизи или на частотах некоторых сильных линий поглощения вместо ожидаемых провалов в спектре генерации возникает интенсивное излучение, как если бы на переходах имело место значительное усиление [6]. Непонятна причина возникновения излучения там, где в обычной линейной внрезонаторной абсорбционной спектроскопии должно регистрироваться поглощение излучения. Результат не укладывается в рамки элементарной теории воздействия узкополосного поглощения на спектр генерации широкополосного лазера. Эффект наблюдается не только в лазерах на красителях. Поведение излучения широкополосного лазера, которое выглядит как захват спектра генерации линиями поглощения, получило название “конденсации спектра” [7]. Его зафиксировали и в других типах широкополосных лазеров, на центрах окраски [8] и в полупроводниковых лазерах [9]. Отметим обширное количество работ в период с 70-х по 90-е гг. прошлого века, в которых делались попытки дать объяснение эффекту. Развернулась дискуссия, в которой участвовали ученые ИФ АН БССР [10]. Ссылки на публикации того периода можно найти в [11, 12]. Практического значения эффект не имел. Он давал лишь увеличение яркости излучения широкополосного лазера на линиях поглощения. Удовлетворительной теории эффекта представлено не было.

Занимаясь проблемой когерентной синхронизации мод и экспериментальной демонстрацией режима в лазере на красителях с ячейкой, заполненной поглощающими парами йода [13, 14], и в титан-сапфировом лазере с поглотителями на парах щелочных металлов [15, 16], мы помнили о дискуссии вокруг причин появления особенностей спектров вблизи линий поглощения в резонаторах широкополосных лазеров. В связи с этим в данной работе представлена часть результатов, не вошедших в упомянутые публикации, которые однозначно демонстрируют роль когерентного характера взаимодействия света с веществом при захвате частоты титан-сапфирового лазера линией DII резонансного поглощения Cs 852 нм. Отметим, что впервые на необходимость учета когерентного характера взаимодействия излучения и поглощающих атомов с большим временем релаксации поляризации перехода  $T_2$  указано в [17, 18]. Дискуссия с одним из авторов (И. А. Чехониным) о роли поляритонных, параметрических и коллективных механизмов во взаимодействии широкополосного лазерного излучения с узкополосными резонансами поглощения послужила толчком к выполнению экспериментов, основные результаты которых представлены в данной работе.

**Экспериментальная установка** (рис. 1) включает в себя лазер Coherent Verdi V10 с максимальной выходной мощностью 10.5 Вт, который использован для накачки активной среды (АС) титан-сапфирового лазера. Резонатор имеет стандартную Z-образную схему, длину 94 см и состоит из зеркал M1—M5. Излучение лазера накачки с помощью линзы L фокусируется в термостатированный титан-сапфировый кристалл АС. В резонаторе расположены поляризационный фильтр Лио (LF) и интерферометр Фабри–Перо (FP). Эти селекторы служат для перестройки частоты генерации. Точная перестройка вблизи линии поглощения Cs осуществляется селектором FP. Парами Cs заполнена ячейка Cell ( $T = 28$  °С). В схему регистрации параметров генерации лазера входят измеритель длин волн LM и измеритель мощности лазерного излучения P. Лазерное излучение подается на скоростной фотодиод PD, напряжение с которого идет на вход цифрового осциллографа DSO Agilent, модель DSO9104A. Временное разрешение системы фотодиод+осциллограф не хуже 300 пс. Часть электрического сигнала идет на вход анализатора радиочастотного спектра RSP (Radio Spectrum Processor, модель RSPduo [19]). В установке предусмотрена возможность вывода сигналов осциллографа, спектрометра и данных с анализатора радиочастотного спектра на экран ноутбука N, что удобно для одновременного просмотра и регистрации всех необходимых данных.

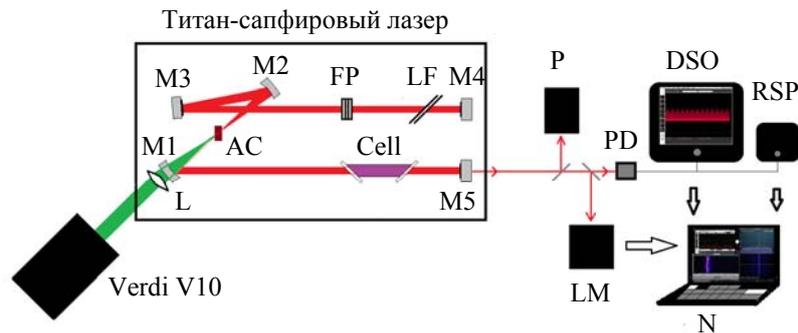


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

**Результаты и их обсуждение.** В отсутствие спектральных селекторов LF и FP спектр генерации лазера находится вне линии поглощения и эффекта захвата частоты не наблюдается. При этом перенастройкой резонатора, перемещением кюветы с парами Cs, нагревом ячейки с парами до  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  при различных мощностях генерации от 10 до 300 мВт эффект конденсации не достигнут в отсутствие спектральных селекторов. При установке фильтра Лио LF и настройке максимума пропускания FP на линию поглощения ДП Cs в лазере возбуждался режим когерентной синхронизации мод (КСМ) за счет формирования поглотителем импульсов самоиндуцированной прозрачности (СИП). Впервые экспериментально режим продемонстрирован при использовании паров рубидия [15, 16], обзор основных работ дан в [20]. Режим сохранялся при отстройке от центра линии на расстояние до 0.1 нм в длинноволновую или коротковолновую область.

Режим КСМ возбуждается, если селектор настроен на длину волны перехода. Если после возбуждения режима КСМ генерацию лазера перестройкой селектора от линии поглощения отводить в красную или синюю область, то в спектре возникают две линии генерации. Генерация остается на частоте перехода в Cs и появляется линия генерации на расстоянии от нее. При удалении линии, которую определяет селектор, интенсивность генерации на линии Cs уменьшается и пропадает при отстройке на расстояние  $>0.5$  нм от линии как с коротковолновой, так и с длинноволновой стороны. Если снова перестраивать длину волны генерации в сторону линии поглощения, то после прохождения линии на ней вновь возникает генерация и она сохраняется, пока отстройка не превышает 0.5 нм. Таким образом, имеет место захват частоты генерации линией поглощения. При этом пассивные потери, создаваемые селекторами на частоте линии поглощения, больше, чем на частоте пропускания интерферометра. Перемещение кюветы или селективных элементов в резонаторе, перенастройка резонатора не мешают воспроизведению эффекта.

На рис. 2 приведена осциллограмма сигнала с фотодиода и радиочастотных спектров при мощности генерации 80 мВт. Видны короткие импульсы большой амплитуды, которые соответствуют 2п-импульсам СИП. Между импульсами наблюдаются всплески с меньшими амплитудами, которые соответствуют излучению на частотах, определяемых селектором. Амплитуда импульсов на осциллограмме изменяется. Радиоспектр также имеет особенности — в нем присутствуют две частоты. Высокочастотная компонента при 155920 кГц (отмечена красной вертикальной линией) соответствует периоду следования импульсов на частотах генерации вне линии поглощения. Низкочастотная компонента, отстоящая на 120 и 240 кГц (рис. 2, б, в), принадлежит генерации на линии поглощения. Импульсы самоиндуцированной прозрачности имеют меньшую частоту следования, поскольку скорость распространения импульсов в поглотителе меньше скорости света и зависит от интенсивности: чем меньше интенсивность, тем меньше скорость. Зависимость отчетливо регистрируется в экспериментах. При удалении генерации на длине волны, определяемой селектором, от линии поглощения Cs интенсивность генерации на линии падает и в радиоспектре частота уменьшается. Модуляция параметров резонатора под действием импульсов СИП не влияет на частоту следования всплесков интенсивности генерации, определяемой селектором. Компонента радиочастотного спектра на длине волны, задаваемой селектором, не меняет своего положения и не испытывает изменений. Генерация на линии поглощения не оказывает на нее воздействия и наоборот.

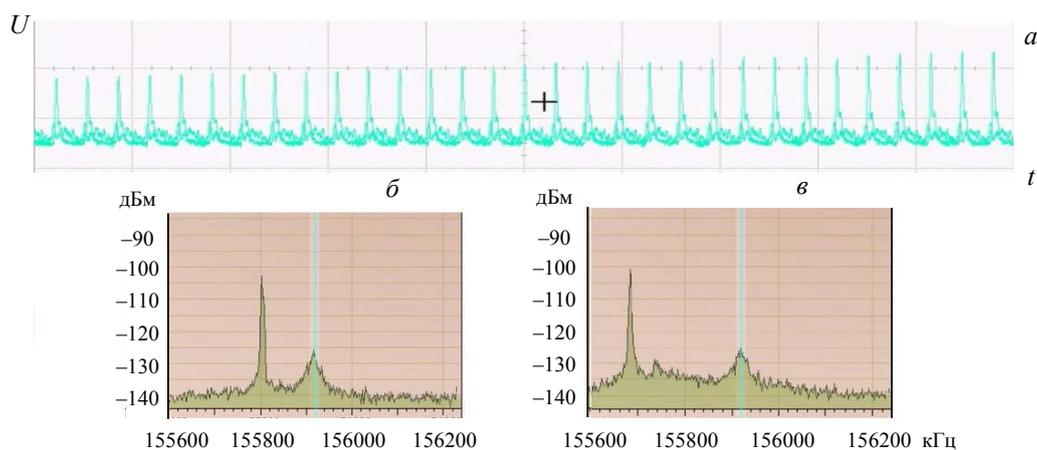


Рис. 2. Осциллограмма напряжения с фотодиода (*a*),  $t = 20$  нс/дел,  $U = 20$  мВ/дел, и радиоспектры (*б*) и (*в*); разность длин волн 0.3 (*a*, *б*) и 0.4 нм (*в*)

Когда селектор настроен на длину волны поглощения Cs, частота следования импульсов в режиме КСМ приближается к разности частот между соседними модами, когда генерация вне линии поглощения, однако остается меньше ее на 20 кГц. Пример осциллограммы и соответствующего радиоспектра приведены на рис. 3. Широкие компоненты в спектре, располагающиеся симметрично на расстоянии 380 кГц относительно частоты следования импульсов 155900 кГц, показывают наличие слабой модуляции интенсивности, которую можно связать с характерными для твердотельных лазеров релаксационными колебаниями; узкие линии малой амплитуды — наводки от лабораторной аппаратуры. Мощность генерации титан-сапфирового лазера 80 мВт.

В режиме КСМ в резонаторе лазера может присутствовать не один импульс. При наличии нескольких импульсов реализуется нерегулярный режим КСМ. Число импульсов и амплитуда каждого из них изменяются. В радиочастотном диапазоне спектр компоненты, соответствующей излучению на линии поглощения, уширяется. Однако и в этом случае отсутствуют изменения в спектре компоненты на частоте, задаваемой селектором.

При выполнении экспериментов проводились наблюдения за пространственным профилем пучка, выходящего из резонатора. Импульсы СИП могут изменять профиль волнового фронта при распространении в поглотителе. Центральная часть пучка имеет большую интенсивность и должна двигаться быстрее, менее интенсивные края — медленнее.

Таким образом, если исходно фронт волны плоский, то пучок становится расходящимся, что изменяет конфигурацию резонатора. По нашему мнению, подобное влияние незначительно. Так, при различных настройках резонатора получена генерация в режиме КСМ не только на основной, но и на высших поперечных модах, когда распределение интенсивности по поперечному сечению пучка крайне неоднородно. При генерации вне линии поглощения форма пятна не менялась. Результат свидетельствует в пользу малого влияния поглотителя на структуру пучка.

На рис. 4 приведена фотография пятна генерации на экране. Зеленый цвет обусловлен тем, что снимок сделан с помощью ЭОП. Пучок имеет вид, характерный для поперечной моды  $TEM_{20}$ . Съемка проводилась сбоку, поэтому пятно имеет наклон.

В экспериментах по захвату частоты показана определяющая роль когерентного характера взаимодействия излучения с поглотителем, которая формирует временные и спектральные характеристики излучения в пределах и ближайшей окрестности линии поглощения. Генерация в режиме КСМ в зависимости от настройки селектора имеет место в центре линии поглощения, а также с длинноволновой и с коротковолновой стороны при отстройке центра линии  $\leq 0.1$  нм. Поглотитель формирует в резонаторе лазера  $2\pi$ -импульсы самоиндуцированной прозрачности, длительность которых намного меньше времени релаксации поляризации  $T_2$  поглотителя. В излучении на частоте линии поглощения и в ближайшей окрестности в резонаторе могут присутствовать один или несколько импульсов самоиндуцированной прозрачности. Если в резонаторе поглотитель формирует импульсы с нулевой площадью ( $0\pi$ -импульсы), то спектр генерации имеет форму дублета, окружающего линию поглощения. Режим генерации  $0\pi$ -импульсов наблюдается крайне редко.

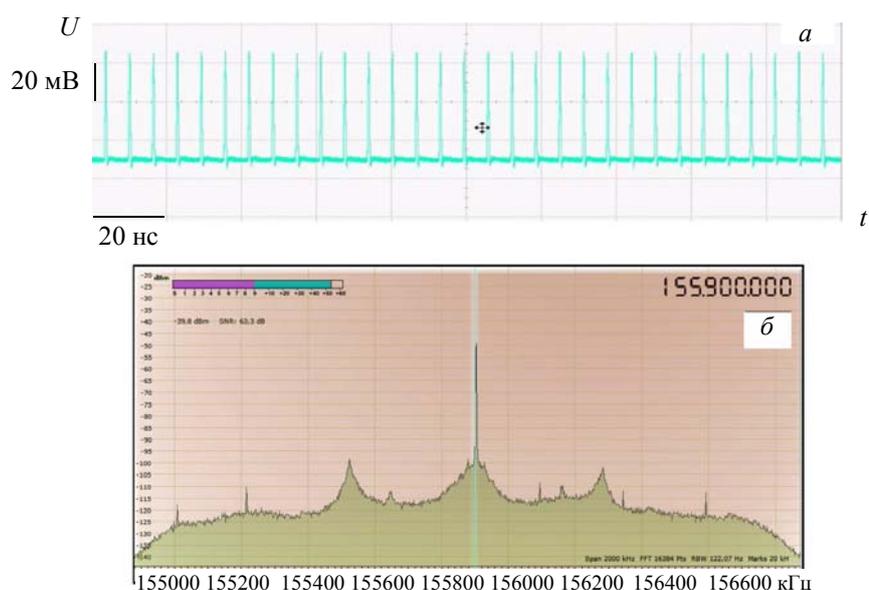


Рис. 3. Осциллограмма напряжения с фотодиода (*a*),  $t = 20$  нс/дел,  $U = 20$  мВ/дел; радиоспектр (*б*)



Рис. 4. Пятно генерации лазера

Не зафиксировано влияния захваченного поглощающим переходом излучения на излучение второй компоненты спектра, задаваемой селектором. При распространении импульсов самоиндуцированной прозрачности поглотитель находится в возбужденном состоянии в течение очень короткого промежутка времени. Все остальное время он пребывает в невозбужденном состоянии. Об этом свидетельствует наблюдение за интенсивностью люминесценции Cs в ячейке. Она мала при наличии одного импульса в резонаторе и чем мощнее генерация, тем свечение менее интенсивно, так как при росте мощности длительность импульса самоиндуцированной прозрачности сокращается. Интенсивность свечения возрастает при увеличении числа импульсов, одновременно присутствующих в резонаторе.

Возникновение генерации в пределах линии поглощения требует ее инициирования. При малом уровне интенсивности в момент развития генерации поглотитель вносит значительные потери. При конкуренции двух частот на этапе развития генерации в лучшем положении оказывается излучение вне линии поглощения. Однако, если инициировать генерацию на линии поглощения, что и происходит при перестройке селектора, она конкурирует с генерацией в области спектра, где пассивные потери меньше. Поведение поглотителя в такой ситуации выглядит необычно. Он не только перестает проявлять свои поглощающие свойства, но и ведет себя так, как будто обладает способностью усиливать излучение. Поэтому возникновение эффекта “конденсации” пытались объяснить привлечением представлений о поляритонах, изменениями формы линии поглощения и параметрическими коллективными взаимодействиями [21].

Поляритонный характер излучения на линии поглощения, при котором интенсивность излучения постоянна или должна медленно изменяться с кооперативной частотой, в выполненных нами экспериментах не обнаружен. Излучение вне линии поглощения не оказывало воздействия на поглощающий переход. Не обнаружено его взаимодействие с излучением за счет параметрических и коллективных эффектов, не возникает также усиление на частоте поглощающего перехода и вблизи него,

как предсказано в [22, 23]. В ходе экспериментов по наблюдению поведения радиочастотного спектра при медленном движении линии генерации к линии поглощения в области отстройки 0.1 нм при инициировании режима КСМ обнаружены некоторые особенности, которые не свидетельствуют в пользу указанных выше интерпретаций и являются предметом отдельного исследования с точки зрения инициирования режима КСМ.

Для объяснения эффектов захвата частоты нет смысла оперировать понятием “профиль усиления/поглощения” и экспериментально его определять, используя *rumpr-probe*-методику с длительностями импульсов меньше времени  $T_2$ , поскольку при когерентном взаимодействии коротких импульсов усиление или поглощение пробного пучка зависит от разности фаз в импульсах излучения и периодически изменяется при их изменении.

Широкополосный лазер с резонансным узкополосным поглотителем является сложной нелинейной динамической многомодовой системой. Каждый конкретный эксперимент обладает спецификой. Когерентное взаимодействие излучения с поглотителем, ведущее не к поляритонному излучению, а к когерентной синхронизации мод за счет самоиндуцированной прозрачности, служит основным механизмом захвата частоты.

**Заключение.** Существование многочисленных гипотез и отсутствие убедительного теоретического объяснения эффекта “конденсации” связано с отсутствием измерений временных характеристик излучения на частотах поглощения. Например, в [24] при выполнении эксперимента, схожего с [13], не зафиксирован режим синхронизации мод, поэтому захват частоты излучения объяснен пространственным профилем распределения поглощающих атомов. Измерения временных характеристик генерации отсутствуют и в работах [17, 18], где впервые было высказано предположение о роли когерентных эффектов как основного механизма, ведущего к появлению особенностей типа “конденсации” спектра вблизи сильных линий поглощения, не подтверждаемое прямыми измерениями и в других работах тех же авторов. Однако нами допускается возможность выполнения экспериментов, в которых будут продемонстрированы поляритонный характер генерации на сильных линиях поглощения и доминирующая роль параметрических и кооперативных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-72-10028) с использованием оборудования ресурсного центра “Оптические и лазерные методы исследования вещества” Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета (Россия).

- [1] **Б. И. Степанов, А. Н. Рубинов, В. А. Мостовников.** Журн. прикл. спектр., **6** (1967) 300
- [2] **А. С. Кузнецов, Т. В. Богатова, Б. М. Ужинов.** Вестн. Московского ун-та. Сер. 2. Химия, **53**, № 2 (2012) 133—143
- [3] Внутриврезонаторная лазерная спектроскопия: Указатель отечественной и иностранной литературы (1970—1980 гг.), под ред. В. С. Буракова, П. А. Науменкова, Минск, Институт физики АН БССР (1982) 115
- [4] **Л. А. Пахомычева, Э. А. Свириденков, А. Ф. Сучков, Л. В. Титова, С. С. Чурилов.** Письма в ЖЭТФ, **12**, № 2 (1970) 60—63 [**L. N. Pakhomycheva, E. A. Sviridenkov, A. F. Suchkov, L. V. Titova, S. S. Churilov.** Sov. Phys. JETP Lett., **12**, N 2 (1970) 43—45]
- [5] **В. М. Баев, Т. П. Беликова, Э. А. Свириденков, А. Ф. Сучков.** ЖЭТФ, **74**, № 1 (1978) 43—56 [**V. M. Baev, T. P. Belikova, E. A. Sviridenkov, A. F. Suchkov.** Sov. Phys. JETP, **47**, N 1 (1978) 21—29]
- [6] **Р. К. Runge.** Opt. Commun., **4**, N 3 (1971) 195—198
- [7] **В. В. Васильев.** Исследование эффекта конденсации спектра при внутриврезонаторной лазерной накачке вещества, дис. ... канд. физ.-мат. наук, 01.04.05, Ленинград (1987)
- [8] **А. Н. Колеров.** Квант. электрон., **13**, № 8 (1986) 1645—1651 [**A. N. Kolerov.** Sov. J. Quantum Electron., **16**, N 8 (1986) 1074—1077]
- [9] **Е. V. Bertseva, A. Campargue.** Opt. Commun., **232** (2004) 251
- [10] **А. Н. Рубинов, М. В. Белоконов, А. В. Адамушко.** Квант. электрон., **6**, № 4 (1979) 723—729 [**A. N. Rubinov, M. V. Belokon', A. V. Adamushko.** Sov. J. Quantum. Electron., **9**, N 4 (1979) 433—436]
- [11] **В. М. Баев, Т. П. Беликова, О. П. Варнавский, В. Ф. Гамалий, С. А. Коваленко, Э. А. Свириденков.** Письма в ЖЭТФ, **42**, № 10 (1985) 416—418 [**V. M. Baev, T. P. Belikova, O. P. Varnavskii, V. F. Gamaliy, S. A. Kovalenko, E. A. Sviridenkov.** JETP Lett., **42** (1985) 514—516]
- [12] **А. Н. Колеров.** Высококочувствительные лазерные методы измерений параметров веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях, дис. ... д-ра физ.-мат. наук, 01.04.21, Москва (2000)

- [13] М. В. Архипов, Р. М. Архипов, А. А. Шимко, И. В. Бабушкин. Письма в ЖЭТФ, **101**, № 4 (2015) 250—253 [M. V. Arkhipov, R. M. Arkhipov, A. A. Shimko, I. Babushkin. JETP Lett., **101**, N 4 (2015) 232—235]
- [14] M. V. Arkhipov, A. A. Shimko, R. M. Arkhipov, I. Babushkin, A.A. Kalinichev, A. Demircan, U. Morgner, N. N. Rosanov. Laser Phys. Lett., **15**, N 7 (2018) 075003
- [15] М. В. Архипов, Р. М. Архипов, А. А. Шимко, И. Бабушкин, Н. Н. Розанов. Письма в ЖЭТФ, **109**, № 10 (2019) 657—661 [M. V. Arkhipov, R. M. Arkhipov, A. A. Shimko, I. Babushkin, N. N. Rosanov. JETP Lett., **109**, N 10 (2019) 634—637]
- [16] M. V. Arkhipov, A. A. Shimko, N. N. Rosanov, I. Babushkin, R. M. Arkhipov. Phys. Rev. A, **101**, N 1 (2021) 013803
- [17] В. В. Васильев, В. С. Егоров, И. А. Чехонин. Опт. и спектр., **58** (1985) 944 [V. V. Vasilev, V. S. Egorov, I. A. Chekhonin. Opt. and Spectr., **58** (1985) 578]
- [18] В. В. Васильев, В. С. Егоров, И. А. Чехонин. Опт. и спектр., **60** (1986) 664 [V. V. Vasilev, V. S. Egorov, I. A. Chekhonin. Opt. and Spectr., **60** (1986) 405]
- [19] <https://www.sdrplay.com/rspduo/>
- [20] Н. Н. Розанов, И. А. Александров, М. В. Архипов, Р. М. Архипов, И. Бабушкин, Н. А. Веретенев, А. В. Дадеко, Д. А. Тумаков, С. В. Федоров. Квант. электрон., **51**, № 11 (2021) 959—969 [N. N. Rosanov, I. A. Aleksandrov, M. V. Arkhipov, R. M. Arkhipov, I. Babushkin, N. A. Veretenov, A. V. Dadeko, D. A. Tumakov, S. V. Fedorov. Quantum Electron., **51**, N 11 (2021) 959—969]
- [21] S. N. Bagayev S. N. Bagayev, R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, V. S. Egorov, I. A. Chekhonin, M. A. Chekhonin. J. Phys.: Conf. Ser., **917** (2017) 062028
- [22] С. Н. Багаев, В. С. Егоров, П. В. Морошкин, А. Н. Федоров, И. А. Чехонин. Опт. и спектр., **86**, № 6 (1999) 912—917 [S. N. Bagaev, V. S. Egorov, A. N. Fedorov, I. A. Chekhonin. Opt. and Spectr., **86**, N 6 (1999) 814—819]
- [23] С. Н. Багаев, В. С. Егоров, П. В. Морошкин, А. Н. Федоров, И. А. Чехонин. Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Физика и химия, № 4 (2013) 142—145
- [24] М. В. Данилейко, А. М. Негрийко, В. М. Ходаковский, Л. П. Яценко. ЖТФ, **55**, № 11 (1985) 2139—2143 [M. V. Danileiko, A. M. Negriiko, V. M. Khodakovskii, L. P. Yatsenko. Zh. Tekhn. Fiz., **55**, N 11 (1985) 2139—2143]