

Источник излучения на длине волны 457 нм на основе полупроводникового лазера для прецизионной спектроскопии атомов магния

А.Н.Гончаров, В.И.Барауля, А.Э.Бонерт, М.А.Тропников

Сообщается о создании высокостабильного источника излучения на длине волны 457 нм на основе диодного лазера и полупроводникового усилителя с расширяющимся каналом усиления, работающего по двухпроходной схеме. Частота излучения полупроводникового лазера стабилизировалась по полосе пропускания высокочастотного опорного интерферометра Фабри–Перо и удваивалась в нелинейном кристалле PPSLT, помещенном во внешний резонатор. При максимальной мощности излучения на длине волны 457 нм, равной 200 мВт, ширина линии излучения составила менее 5 кГц. Работоспособность источника излучения продемонстрирована в экспериментах по прецизионной спектроскопии холодных атомов магния в магнитооптической ловушке.

Ключевые слова: стандарты частоты, магний, полупроводниковый лазер, оптический усилитель, магнитооптическая ловушка, прецизионная спектроскопия.

1. Введение

Оптические стандарты частоты на основе холодных атомов представляют большой интерес как для различных приложений в навигации и метрологии, так и для проведения фундаментальных физических исследований. В настоящее время созданы или разрабатываются стандарты частоты в оптическом диапазоне на основе холодных атомов иттербия, стронция, ртути, тулия и магния [1]. Атомы магния имеют некоторые привлекательные свойства для их применения в оптических стандартах частоты – это малая величина сдвига частоты часового перехода за счет теплового излучения, простота электронной конфигурации, наличие сильного замкнутого перехода, позволяющего осуществлять быстрое и эффективное охлаждение до температуры порядка 3–5 мК и локализацию атомов в магнитооптической ловушке (МОЛ), наличие узких оптических переходов между основным состоянием 1S_0 и триплетными состояниями $^3P_{0,1,2}$. Интеркомбинационный переход $^1S_0 - ^3P_1$, имеющий естественную ширину ~ 30 Гц, является самым узким интеркомбинационным переходом среди атомов щелочноземельных элементов, представляющих интерес для оптических стандартов частоты. Этот переход может быть использован для получения высокой долговременной стабильности оптического стандарта частоты. Несмотря на ряд трудностей, возникающих при создании оптических стандартов частоты на основе атомов магния, которые связаны со

сложностью глубокого охлаждения атомов до температур ~ 10 мК [2–4] и относительно большой величиной квадратичного эффекта Зеемана [5], в последнее время получены обнадеживающие результаты, демонстрирующие перспективность атомов магния для создания стандарта частоты с относительной погрешностью $10^{-17} - 10^{-18}$ [6].

Для создания оптического стандарта частоты с использованием интеркомбинационного перехода $^1S_0 - ^3P_1$ атомов магния необходим высокостабильный источник излучения на длине волны 457 нм. В настоящее время такой источник может быть создан на основе лазера на красителях [7], второй гармоники излучения Nd:YVO₄-лазера на $\lambda = 914$ нм [8], второй гармоники излучения титан-сапфирового лазера [9], второй гармоники излучения диодного лазера на $\lambda = 914$ нм [10] или прямого излучения полупроводникового лазера на $\lambda = 457$ нм [11]. Наиболее компактным источником может являться полупроводниковый лазер на длине волны 457 нм. Однако для стандарта частоты необходимо высокостабильное излучение мощностью ~ 100 мВт. В настоящее время получение такой мощности для лазерного диода в области 457 нм связано с определенными трудностями. Более того, в синей области спектра возникают сложности в создании высокоотражающих зеркал для интерферометра, по полосе пропускания которого осуществляется предварительная стабилизация частоты лазера. Для переноса метрологических характеристик оптического стандарта частоты из синей области спектра также возникают сложности, т. к. традиционные фемтосекундные синтезаторы оптических частот работают в ближней ИК области спектра, и для получения стабильной гребенки частот в синей области спектра необходимы дополнительные усилия.

Представляется, что для создания компактного высокостабильного источника на длине волны 457 нм для стандарта частоты наиболее многообещающей в настоящее время является система на основе второй гармоники излучения полупроводникового лазера, работающего на $\lambda = 914$ нм. Для эффективного преобразования во вторую

А.Н.Гончаров. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092 Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20

В.И.Барауля, А.Э.Бонерт, М.А.Тропников. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б; e-mail: tropnikov@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 2 декабря 2019 г.

гармонику излучение на длине волны 914 нм должно быть достаточно мощным – порядка 1 Вт. Однако выходная мощность одночастотного лазерного диода, как правило, составляет несколько десятков милливатт. Один из эффективных методов увеличения мощности лазерной системы от нескольких милливатт до уровня 1 Вт был продемонстрирован в работе [12]. В настоящей работе использован этот метод и создана лазерная система, представляющая собой полупроводниковый лазерный диод на длине волны 914 нм и полупроводниковый усилитель с расширяющимся каналом (ТА), работающий по двухпроходной схеме. Усиленное излучение использовалось для генерации второй гармоники в нелинейном кристалле PPSLT (Periodically Poled Stoichiometric Lithium Tantalate) во внешнем резонаторе. Полученные параметры источника излучения позволяют проводить эксперименты по спектроскопии высокого разрешения холодных и локализованных в магнитооптической ловушке атомов магния и использовать его в качестве «часового» в оптическом стандарте частоты.

2. Экспериментальная установка

Источник излучения представляет собой лазерную систему на основе задающего генератора (ЗГ) и оптического усилителя мощности (ОУМ). Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

В качестве задающего генератора использовался полупроводниковый лазер с внешним резонатором, собранный по схеме Литтрова. Настройка длины волны излучения осуществлялась путем поворота дифракционной решетки, изменения напряжения на пьезокерамике, на которую была установлена дифракционная решетка, а также изменением температуры и тока лазерного диода (ЛД). На длине волны 914 нм мощность лазера составляла 25 мВт. Излучение полупроводникового лазера пропускалось через оптический изолятор И1, небольшая часть излучения (~2 мВт) с помощью делительного зеркала направлялась на измеритель длин волн. Лазерное излучение вводилось в усилитель с помощью оптического изолятора И2. Полуволновые пластинки $\lambda/2$ использовались для настройки поляризации и регулировки мощности излучения, падающего на усилитель. Согласование пучков задающего генератора и усилителя осуществлялось посредством двух линз – цилиндрической линзы ЦЛ с фокусным расстоянием $f = 75$ мм и асферической линзы АЛ с $f = 4.5$ мм. Излучение, прошедшее через чип усилителя, коллимировалось другой АЛ ($f = 4.5$ мм) и возвращалось назад с помощью оптически плотного плоского зеркала. В качестве усилителя использовался чип ТА-0920-1000 (Coherent-Dilas). Асферические линзы и чип усилителя монтировались в едином корпусе, установленном на элемент Пельтье, что позволило стабилизировать температуру внутри корпуса усилителя. Максимальная мощность усилен-

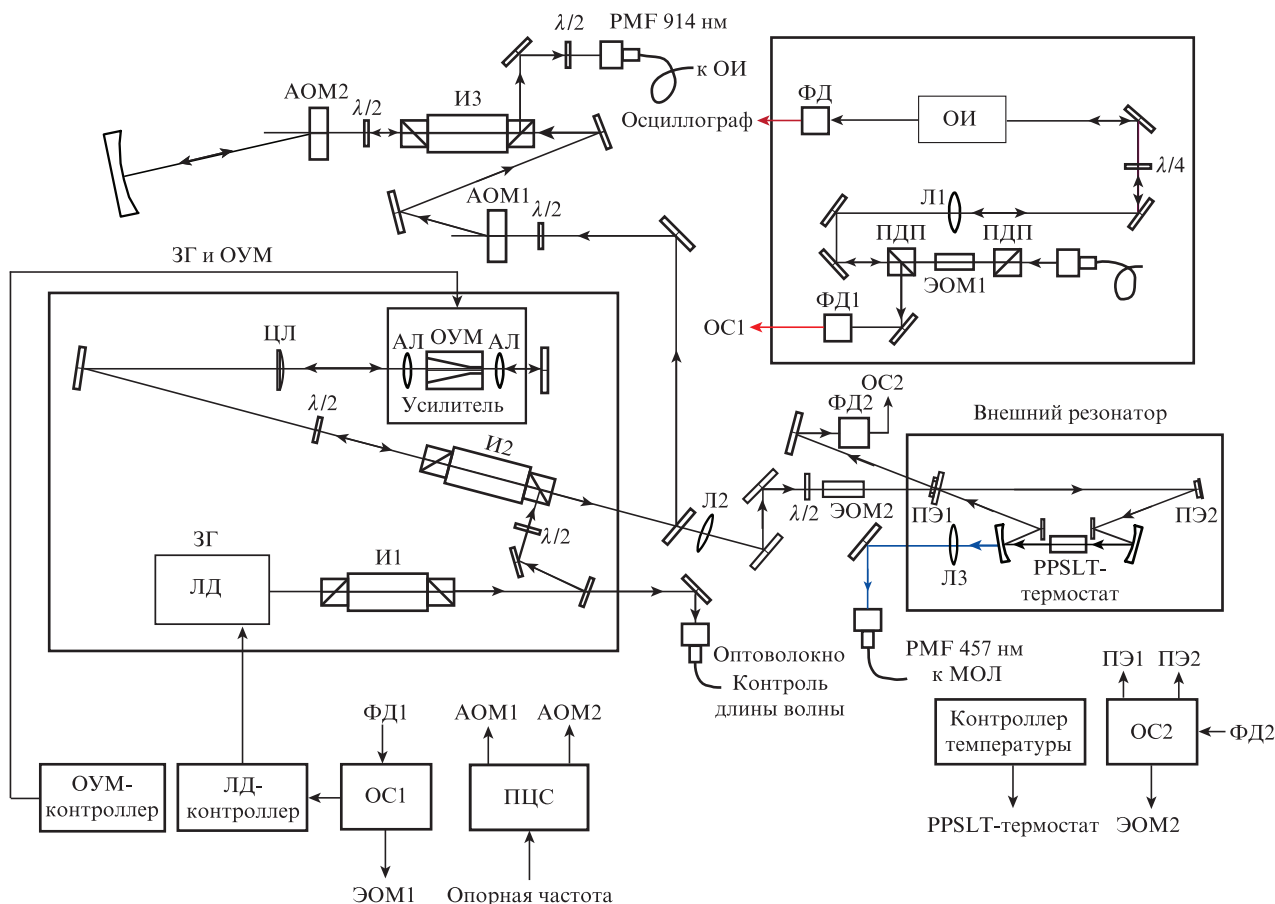


Рис.1. Схема экспериментальной установки: ЗГ – лазерный диод (ЛД) с внешним резонатором; ОУМ – полупроводниковый усилитель с расширяющимся каналом (tapered amplifier); АОМ – акустооптический модулятор; PMF – оптическое волокно с сохранением поляризации; ОИ – опорный интерферометр; ПДП – поляризационный делитель пучка; ЭОМ – электрооптический модулятор; ПЦС – прямой цифровой синтезатор; ФД – фотодетектор; ОС1 и ОС2 – кольца обратной связи; И1, И2 и И3 – оптические изоляторы; ПЭ1 и ПЭ2 – пьезокерамические элементы.

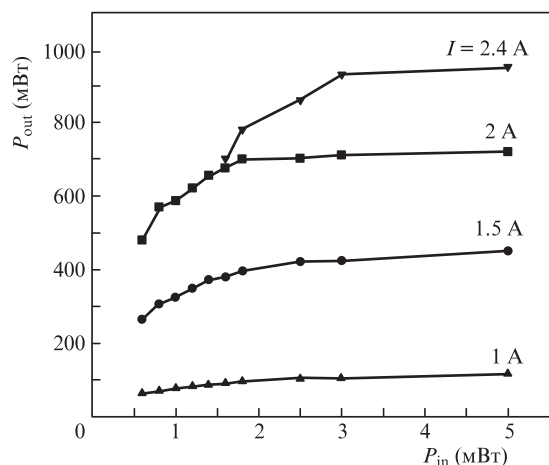


Рис.2. Зависимость мощности усиленного излучения P_{out} от мощности на входе в усилитель P_{in} при различных токах накачки.

ного излучения согласно спецификации производителя могла составлять 1 Вт при токе накачки 2.6 А. Зависимость мощности усиленного излучения от тока накачки и мощности на входе в усилитель приведена на рис.2.

Видно, что при мощности излучения $P_{in} > 3$ мВт усилитель насыщается при всех значениях тока накачки. Часть выходной мощности усилителя (примерно 10%) с помощью дельтазеркала отводилось в систему стабилизации частоты, основная часть излучения через согласующую линзу Л2 направлялась во внешний резонатор с нелинейным кристаллом PPSLT. Внешний резонатор был собран по схеме «бабочка» с радиусом кривизны сферических зеркал 100 мм. Нелинейный кристалл PPSLT длиной 20 мм (Deltronic Crystal Industries Inc.) устанавливался между сферическими зеркалами в области малой перетяжки резонатора. Оба торца кристалла были просветлены на длины волн 457 и 914 нм. Температура синхронизма для $\lambda = 914$ нм при периоде структуры $\Lambda = 4.9$ мкм, равная 87°C , устанавливалась и поддерживалась с помощью температурного контроллера TC-200 (Thorlabs). Привязка пика пропускания внешнего резонатора к частоте диодного лазера осуществлялась методом Паунда–Древера–Холла [13].

Зависимость мощности второй гармоники ($\lambda = 457$ нм) от мощности излучения (914 нм) на входе внешнего резонатора приведена на рис.3. Излучение второй гармоники

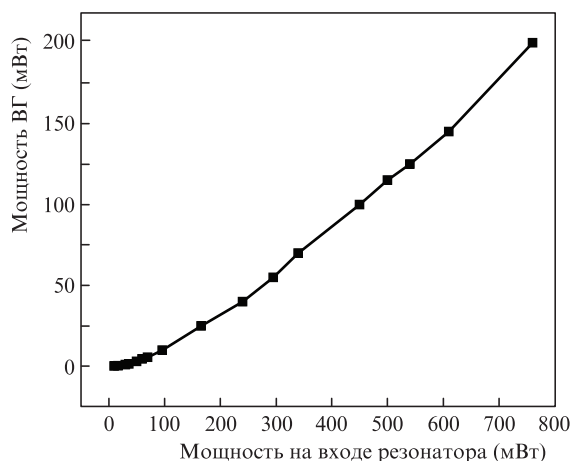


Рис.3. Зависимость мощности второй гармоники от мощности излучения на $\lambda = 914$ нм на входе внешнего резонатора.

выводилось через одно из сферических зеркал внешнего резонатора, коллимировалось линзой Л3 и вводилось в одномодовое волокно с сохранением поляризации (PMF) для дальнейшего использования в экспериментах с холодными атомами магния.

Частота излучения лазерной системы стабилизировалась по полосе пропускания интерферометра Фабри–Перо методом Паунда–Древера–Холла [13]. База опорного интерферометра представляла собой цилиндр из ситалла длиной 20 см и диаметром 80 мм с осевым отверстием диаметром 10 мм, на торцы которого были наклеены зеркала интерферометра. Интерферометр, смонтированный в медном тепловом экране, помещался в вакуумную камеру, в которой поддерживалась температура 30°C с помощью цифровой системы термостабилизации [14]. Вакуумная камера с интерферометром устанавливалась на виброизоляционный стол Minus K 100BM-4. Область свободной дисперсии интерферометра $\text{FSR} = 740$ МГц, острота $F = 700$. Так как частота ближайшего пика опорного интерферометра отличалась от частоты часового перехода $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ атома магния приблизительно на -30 МГц, излучение вводилось в интерферометр через акустооптические модуляторы АОМ1 и АОМ2. Первый АОМ, работающий на частоте 180 МГц, использовался для постоянного сдвига частоты излучения. Двухпроходный АОМ2 со средней частотой 75 МГц использовался для сдвига и перестройки частоты излучения лазерной системы. Модуляторы были настроены так, что частотные сдвиги вычитались. Изменяя подаваемую на АОМ2 частоту радиочастотного сигнала в пределах нескольких мегагерц, можно точно настроиться на линию поглощения часового перехода $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ атома магния. Частоты модуляторов устанавливались с помощью четырехканального прямого цифрового синтезатора (ПЦС), управляемого компьютером. Дифрагированное излучение после второго прохода через АОМ2 выводилось с помощью оптического изолятора И3 и направлялось в опорный интерферометр по световоду PMF.

Система стабилизации частоты диодного лазера (Servo Lock1) имела два кольца регулирования: медленное и быстрое. Управляющий сигнал медленного кольца поступал на пьезокерамический элемент диодного лазера, сигнал быстрого кольца управлял током ЛД. Общая ширина полосы обработки системы обратной связи составляла 900 кГц. Ширина линии излучения диодной лазерной системы, полученная в результате стабилизации частоты, определялась по спектру сигнала биений диодного лазера и высокостабильного титан-сапфирового лазера с шириной линии менее 100 Гц [15]. Спектр сигнала биений приведен на рис.4. Полученная ширина линии генерации определялась шумами в системе обратной связи, паразитными сигналами в системе регистрации и может быть существенно уменьшена при использовании более добротного опорного интерферометра.

Для проверки работоспособности созданного источника излучения были проведены эксперименты по регистрации резонансов Рамси–Борде в разнесенных по времени оптических полях при их взаимодействии с холодными атомами магния в магнитооптической ловушке [7]. Схема установки для регистрации резонансов Рамси–Борде в МОЛ представлена на рис.5. При использовании этого метода облако холодных атомов магния последовательно взаимодействует с четырьмя импульсами светового поля (два импульса направлены с одной сто-

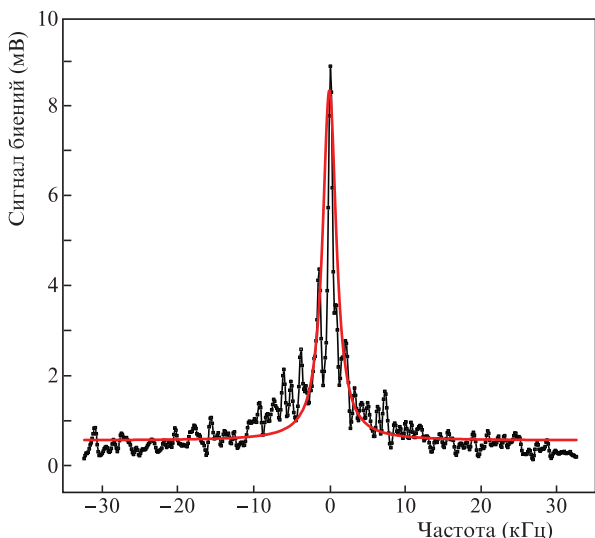


Рис.4. Спектр сигнала биений диодного и титан-сапфирового лазеров. Время сканирования $SWT = 5$ с, разрешающая способность спектрометра RBW равна 100 Гц. Сплошная кривая – аппроксимация лоренцевским контуром с шириной на полувысоте (FWHM) 2.5 кГц.

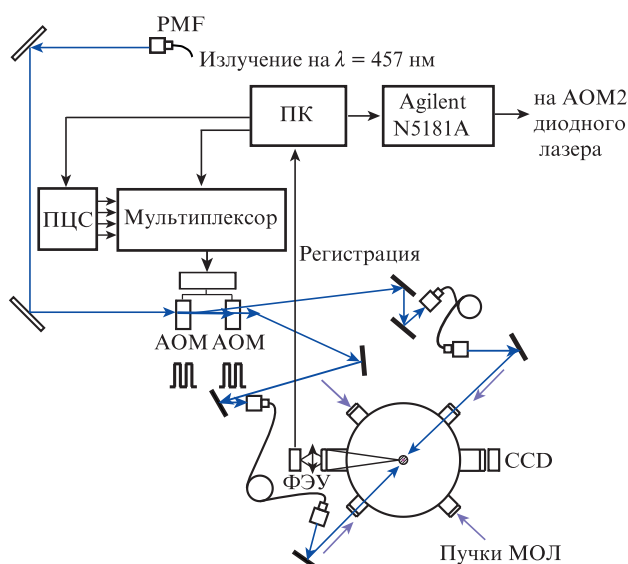


Рис.5. Схема установки для регистрации резонансов Рамси–Борде в магнитооптической ловушке: ПЦС – четырехканальный прямой цифровой синтезатор; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; CCD – камера с ПЗС-матрицей; ПК – персональный компьютер.

роны, два – с противоположной), которые создаются акустооптическими модуляторами АОМ. Ширина регистрируемых резонансов зависит от длительности световых импульсов и от временной задержки в паре сонаправленных импульсов [15].

Излучение диодной лазерной системы ($\lambda = 457$ нм) вводилось в установку с помощью одномодового волокна с сохранением поляризации РМФ. Детали установки для регистрации резонансов Рамси–Борде подробно описаны в работе [16]. Такая регистрация осуществлялась перестройкой частоты излучения диодной лазерной системы с помощью генератора Agilent N5181A, который управлял частотой АОМ2. Сигнал люминесценции холодных атомов магния на переходе $^1S_0 - ^1P_1$ на длине волны 285 нм регистрировался фотоэлектронным умножителем.

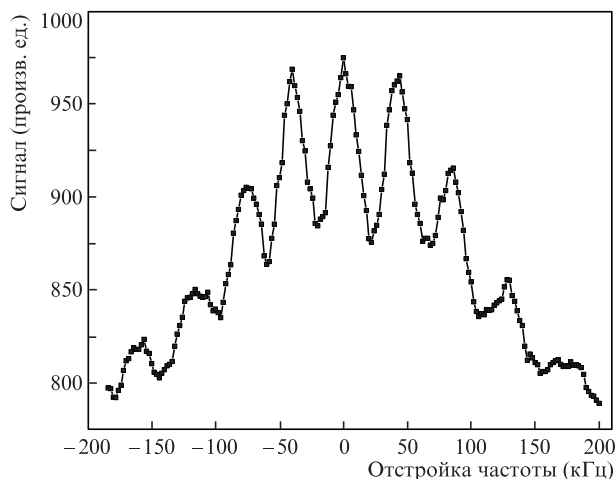


Рис.6. Запись резонансов Рамси–Борде в разнесенных во времени полях при их взаимодействии с облаком холодных атомов магния в МОЛ. Временная задержка между импульсами в паре однонаправленных волн равна 7.5 мкс, что соответствует ширине резонансов $\Delta \approx 20$ кГц. Время интегрирования для каждой точки (всего 200 точек) составляло 0.1 с.

Запись резонансов Рамси–Борде с использованием диодной лазерной системы представлена на рис.6. Хороший контраст резонансов Рамси–Борде позволяет сделать вывод, что с данным источником излучения можно проводить эксперименты по спектроскопии высокого разрешения холодных и локализованных в МОЛ атомов магния и использовать его в качестве «часового» в оптическом стандарте частоты.

В настоящий момент ширина линии излучения $\Gamma < 5$ кГц разработанного источника ограничивается опорным интерферометром, по полосе пропускания которого стабилизируется частота источника излучения. Полученная мощность излучения $P \approx 200$ мВт на длине волны 457 нм является достаточной для проведения спектроскопии часового перехода атомов магния при создании стандарта частоты.

3. Заключение

В результате проведенных исследований создан стабилизированный по частоте источник излучения на длине волны 457 нм на основе диодного лазера и полупроводникового усилителя с параметрами, позволяющими использовать его в экспериментах по созданию стандарта частоты на основе холодных атомов магния. По сравнению с системой на основе титан-сапфирового лазера созданный источник излучения имеет меньшие габариты, значительно меньшую стоимость и существенно проще в эксплуатации. В будущем планируется существенно увеличить стабильность частоты разработанного источника излучения за счет использования более добротного опорного интерферометра и улучшения системы стабилизации частоты.

Исследования по спектроскопии холодных атомов магния проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-02-00514). Работа по усилению мощности излучения и удвоению частоты во внешнем резонаторе выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А19-119102890006-5). Исследование спектральных характеристик источника излучения выполнено при

финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №17-72-20089).

1. Ludlow A.D., Boyd M.M., Ye J., Peik E., Schmidt P.O. *Rev. Mod. Phys.*, **87**, 637 (2015).
2. Prudnikov O.N., Brazhnikov D.V., Taichenachev A.V., Yudin V.I., Bonert A.E., Tropnikov M.A., Goncharov A.N. *Laser Phys.*, **26**, 095503 (2016).
3. Прудников О.Н., Бражников Д.В., Тайченачев А.В., Юдин В.И., Гончаров А.Н. *Квантовая электроника*, **46** (7), 661 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (7), 661 (2016)].
4. Prudnikov O.N., Brazhnikov D.V., Taichenachev A.V., Yudin V.I., Bonert A.E., Il'enkov R.Ya., Goncharov A.N. *Phys. Rev. A*, **92**, 063413 (2015).
5. Kulosa A.P., Fim D., Zipfel K.H., Rühmann S., Sauer S., Jha N., Gibble K., Ertmer W., Rasel E.M., Safronova M.S., Safronova U.I., Porsev S.G. *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 240801 (2015).
6. Jha N., Rähmann S., Fim D., Zipfel K., Sauer S., Friesen W., Ertmer W., Rasel E.M. *Proc. EFTF/IFC* (Besancon, France, 2017, p. 495; ISBN: 978-1-5386-2916-1).
7. Ruschewitz F., Peng J.L., Hinderthür H., Schaffrath N., Sengstock K., Ertmer W. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 3173 (1998).
8. Stoehr H., Rehbein N., Douillet A., Friebe J., Keupp J., Mehlstäubler T.E., Wolff H., Rasel E.M., Ertmer W., Gao J., Giesen A. *Appl. Phys. B*, **91**, 29 (2008).
9. Багаев С.Н., Барауля В.И., Бонерт А.Э., Гончаров А.Н., Сейдалиев М.Р., Фарносов С.А. *Квантовая электроника*, **31** (6), 495 (2001) [*Quantum Electron.*, **31** (6), 495 (2001)].
10. Ruseva V., Hald J. *Appl. Opt.*, **42**, 27 (2003).
11. Vortextm Plus TLB-6802-455, https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h37/h1a/8797219979294/New-Focus-Vortex-Plus-Datasheet.pdf.
12. Volpasi V., von Klitzing W. *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 113108 (2010).
13. Drever R.W.P., Hall J.L., Kowalski F.V., Hough J., Ford G.M., Munley A.J., Ward H. *Appl. Phys. B*, **31**, 97 (1983).
14. Tropnikov M.A., Shilov A.M., Goncharov A.N., Bonert A.E. *Technical Digest of V Russian-Chinese Workshop and School for Young Scientists on Laser Physics and Photonics (RCWLP&P)* (Novosibirsk, Russia, 2015, p. 30).
15. Гончаров А.Н., Бонерт А.Э., Барауля В.И., Тропников М.А., Кузнецов С.А., Тайченачев А.В., Багаев С.Н. *Квантовая электроника*, **48** (5), 410 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (5), 410 (2018)].
16. Гончаров А.Н., Бонерт А.Э., Бражников Д.В., Шилов А.М., Багаев С.Н. *Квантовая электроника*, **44** (6), 521 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (6), 521 (2014)].