

ЛАЗЕРНЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

Синтезатор радиочастот с собственной нестабильностью 5×10^{-15} при времени усреднения 1 с на основе волоконного фемтосекундного эрбиевого лазера

А.Н.Киреев, А.С.Шелковников, А.В.Таусенев, Д.А.Тюриков, М.А.Губин

На основе волоконного фемтосекундного эрбиевого лазера создан радиооптический синтезатор, предназначенный для работы в составе задающего радиогенератора с оптическим He–Ne/CH₄-стандартом частоты ($\lambda = 3.39$ мкм). Синтезатор генерирует эквидистантные гармоники в диапазоне частот 1–10 ГГц со стабильностью, определяемой оптическим стандартом частоты. Формирование устойчивого спектра суперконтинуума в области 1.06 мкм обеспечило стабильную суточную работу синтезатора, что важно для его практических применений во внелабораторных условиях. Прямое сравнение выходных частот двух синтезаторов показало, что модернизация волоконного лазера и системы регистрации фемтосекундных импульсов позволила снизить собственную нестабильность синтезатора до 5×10^{-15} при времени усреднения 1 с. Эта нестабильность на порядок меньше полученной нами ранее.

Ключевые слова: фемтосекундный синтезатор, волоконный лазер, He–Ne/CH₄-стандарт частоты, генератор со сверхнизким фазовым шумом.

1. Введение

Синтезаторы оптических частот и радиочастот на основе фемтосекундных лазеров, активно развивающиеся последние 20 лет [1, 2], стали неотъемлемым лабораторным инструментом для прецизионных частотно-временных и спектроскопических измерений, доказавшим свою способность эффективно переносить точность и стабильность частоты оптических генераторов как внутри оптического диапазона, так и между ним и радиодиапазоном спектра [3–7]. Требования к параметрам (собственным шумам, вносимой частотно-фазовой погрешности) и структурной схеме фемтосекундных синтезаторов обусловлены главным образом областью их применения, диапазоном рабочих частот, а также задающим стабильность и точность частоты стандартом.

Поскольку фемтосекундные синтезаторы представляют собой сложные лазерно-оптические системы, часто требующие лабораторных условий эксплуатации, то одним из направлений их совершенствования является обеспечение надежности, компактности и транспортируемости, в том числе за счет упрощения оптической схемы. При этом сохраняется основное требование – собственная нестабильность фемтосекундного синтезатора не должна вносить заметного вклада в процесс переноса стабильности частоты используемого стандарта.

А.Н.Киреев, А.С.Шелковников, А.В.Таусенев, Д.А.Тюриков. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: shelkov@lebedev.ru
М.А.Губин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево

Поступила в редакцию 14 сентября 2020 г., после доработки – 12 октября 2020 г.

Наибольший прогресс в развитии фемтосекундных синтезаторов достигнут в оптическом диапазоне. Так, в работе [8] продемонстрировано создание шкалы времени, полностью базирующейся на оптических технологиях. Ее основой служит стандарт частоты на атомах ⁸⁷Sr в оптической решетке со стабильностью $3.5 \times 10^{-17} \tau^{1/2}$, где τ – время усреднения в секундах. Входящий в состав установки фемтосекундный синтезатор, связывающий используемые оптические частоты (или длины волн 0.698 и 1.542 мкм), имеет собственную нестабильность 1.6×10^{-18} при $\tau = 1$ с [6].

Другая важная область применений фемтосекундных синтезаторов – создание на их основе источников радиочастот. Переход из оптического в радиодиапазон базируется на фотодетектировании непрерывной последовательности фемтосекундных световых импульсов с последующим выделением гармоник СВЧ спектра. Интервал между гармониками определяется частотой следования импульсов, а ширина наблюдаемого спектра – быстрым действием фотодетектора. Стабильность частоты гармоник на выходе фотодетектора значительно ниже стабильности компонент оптического спектра фемтосекундного синтезатора. Уменьшение стабильности связано с насыщением фотодетектора импульсами с большой энергией и преобразованием амплитудных шумов фемтосекундного лазера в фазовый шум радиочастоты в процессе фотодетектирования [9].

Фемтосекундные синтезаторы радиочастот с высшим уровнем стабильности ($\sim 6 \times 10^{-16}$ при $\tau = 1$ с) представляют собой сложные оптические системы, работающие в лабораторных условиях [7, 10]. Измерение их характеристик – отдельная задача, для решения которой необходимо создание уникальных специализированных радиоэлектронных устройств.

Однако существует ряд приложений, для которых требуются фемтосекундные синтезаторы с меньшей стабильностью (10^{-14} – 10^{-15} при $\tau = 1$ с), но способные устойчиво

работать во внелабораторных условиях, заменяя традиционные кварцевые генераторы и лазеры. Это – транспортируемые эталоны времени и частоты на «фонтанах» холодных атомов, высокоскоростная связь следующих поколений, когерентные радары, радиоастрономия и другие приложения [11–14].

Цель настоящей работы – исследование собственной нестабильности волоконных фемтосекундных эрбиевых синтезаторов, разработанных для переноса стабильности частоты компактного He–Ne/CH₄-лазера из оптического в радиодиапазон.

В наиболее близкой по направленности работе [15] описан компактный, транспортируемый радиооптический генератор на основе малошумящего волоконного фемтосекундного эрбиевого синтезатора, стабилизированного по оптическому резонатору, изготовленному из ULE-стекла. В настоящее время данная система, синтезирующая высокостабильные СВЧ сигналы в диапазоне частот 2–12 ГГц, рекламируется как коммерческий продукт [16]. Важной особенностью является компактность системы, занимающей лишь часть приборной стойки, и ее меньшая требовательность к стабильности внешних условий по сравнению со стационарными лабораторными устройствами, располагающимися на оптических столах в помещениях с кондиционерами.

В нашей работе [17] был описан волоконный фемтосекундный эрбиевый синтезатор с нестабильностью частоты (девиацией Аллана) около 5×10^{-14} при $\tau = 1$ с на несущей частоте 1.5 ГГц. При измерениях на входе частотомера использовался фильтр с полосой 100 Гц. Синтезатор входит в состав радиооптического задающего генератора на основе стабилизированного He–Ne/CH₄-лазера. Эксперимент с применением «метанового» задающего генератора в качестве источника опорной частоты 100 МГц был проведен на комплексе цезиевых и рубидиевых «фонтанов» во ВНИИФТРИ [18]. Стабильность выходной частоты 100 МГц задающего генератора ограничивалась используемым коммерческим радиосинтезатором и составляла 3×10^{-14} ($\tau = 1$ с) при измерениях на компараторе с полосой 3 Гц.

Во время проведения длительных измерений во ВНИИФТРИ были обнаружены нестационарные импульсные выбросы частоты фемтосекундного синтезатора, ограничивающие стабильность метанового радиогенератора в целом. В настоящей работе за счет модификации волоконных фемтосекундных эрбиевых синтезаторов достигнуто значительное улучшение собственной кратковременной стабильности частоты и повышена устойчивость их функционирования.

2. Схема и особенности работы фемтосекундного эрбиевого синтезатора

Схема синтезатора представлена на рис.1. Синтезатор создан на основе волоконного фемтосекундного эрбиевого лазера ($\lambda = 1.55$ мкм), частота следования импульсов которого стабилизируется по оптическому He–Ne/CH₄-стандарту частоты ($\lambda = 3.39$ мкм). Для этого спектр эрбиевого лазера переносится в область $\lambda = 3.39$ мкм путем генерации разностной частоты излучений с длинами волн 1.06 и 1.55 мкм, сформированных на оптическом выходе синтезатора [19,20]. Разностная частота генерируется в нелинейном кристалле периодически поляризованного ниобата лития с периодом 30.45 мкм.

Фемтосекундный эрбиевый лазер изготовлен с использованием только поддерживающих поляризацию волокон. Синхронизация мод осуществляется за счет керровской нелинейности в интерферометре Саньяка (нелинейно отражающего петлевого зеркала). Частота следования импульсов лазера составляет 58.9 МГц, ширина спектра генерации – 38 нм, средняя мощность – 40 мВт, длительность импульса – 110 фс. Для стабилизации частоты следования импульсов фемтосекундного лазера концевое зеркало резонатора установлено на пьезокерамический транслятор, позволяющий перемещать зеркало на 10 мкм и реализовывать обратную связь с шириной полосы 20 кГц. На линейном участке резонатора размещен электрооптический фазовый модулятор из ниобата лития, дающий возможность расширить полосу обратной связи до 400 кГц. Компенсация долговременных флуктуаций частоты следования импульсов осуществляется путем изменения температуры небольшого участка волокна с помощью элемента Пельтье.

Излучение эрбиевого лазера разделяется на две части с одинаковой мощностью. Одна часть усиливается до достижения мощности 20 мВт и используется для генерации радиочастотного выходного сигнала синтезатора. Другая часть излучения служит для формирования оптического выхода синтезатора. Для этого она усиливается в волоконном усилителе до мощности 250 мВт и делится с помощью волоконного делителя мощности в соотношении 80/20. Импульсы с выхода делителя 20% сжимаются в волокне с отрицательной дисперсией до импульсов длительностью 150 фс и используются в качестве оптического выхода на $\lambda = 1.55$ мкм. Импульсы с выхода 80% сжимаются до импульсов длительностью около 300 фс и поступают в германо-силикатное волокно с высокой нелинейностью, где происходит генерация суперконтинуума с пиком на $\lambda = 1.06$ мкм.

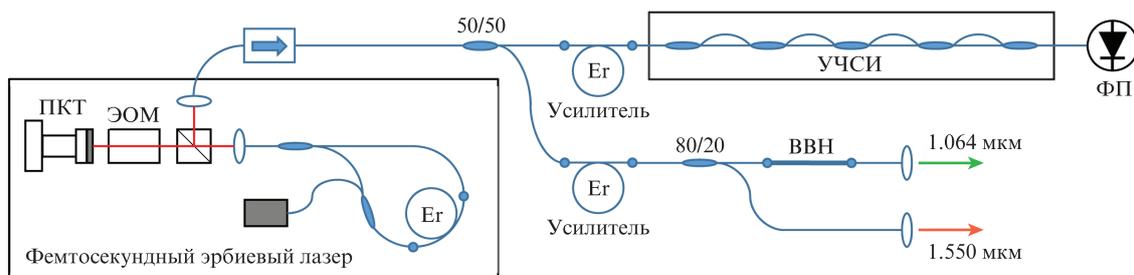


Рис.1. Схема фемтосекундного синтезатора:

ПКТ – пьезокерамический транслятор; ЭОМ – электрооптический модулятор; ВВН – волокно с высокой нелинейностью; УЧСИ – умножитель частоты следования импульсов (последовательность из четырех интерферометров Маха–Цендера); ФП – фотоприемник.

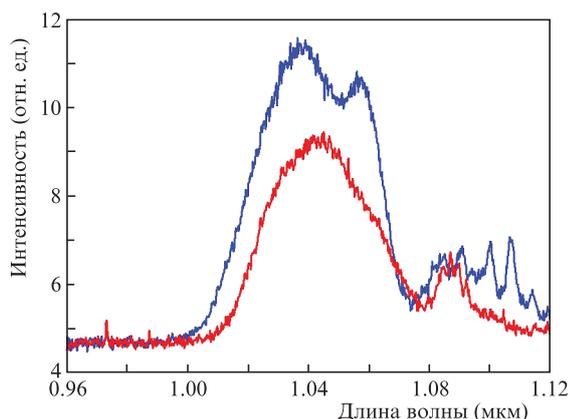


Рис.2. Типичные примеры двух неустойчивых спектров суперконтинуума в области 1.06 мкм с негладкой структурой. Случайные переключения от одного спектра к другому приводят к импульсным выбросам выходной радиочастоты.

Особое внимание уделялось стабильности спектра суперконтинуума в области 1.06 мкм. Сдвиг пика суперконтинуума в коротковолновую область зависит как от параметров волокна (дисперсии, наклона дисперсии и др.), так и от параметров входных импульсов (мощности, длительности и chirpa) [21]. Если параметры волокна подобраны неоптимально, то изменением мощности вводимого в волокно импульса можно добиться сдвига спектра на нужную длину волны, но избыток мощности приводит к тому, что полученный спектр имеет негладкую структуру. В итоге небольшие изменения параметров входных импульсов вызывают скачкообразное изменение формы спектра, что обуславливает нестационарные импульсные выбросы выходной радиочастоты. Типичные примеры двух неустойчивых спектров суперконтинуума приведены на рис.2.

В результате тщательного подбора волокна для оптимального согласования с параметрами оптических импульсов удалось реализовать устойчивый гладкий спектр суперконтинуума без интерференционных осцилляций с явно выраженным пиком на $\lambda = 1.06$ мкм (рис.3). При этом амплитуда пика и положение центральной длины волны плавно (без скачков) изменялись при изменении параметров лазера. Нелинейное волокно имеет следующие характеристики: дисперсия $10 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, диаметр моды по полю 3.75 мкм на длине волны 1.55 мкм, длина волны нулевой дисперсии 1.32 мкм, наклон дисперсии

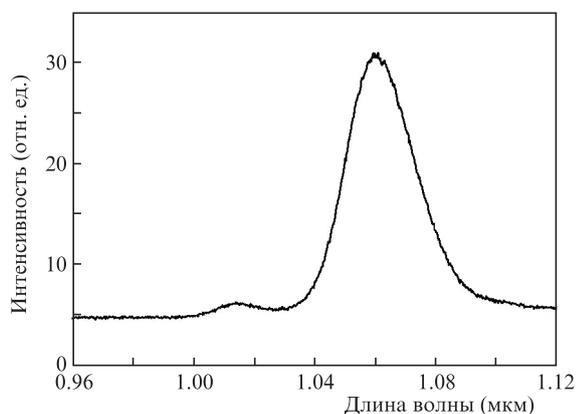


Рис.3. Устойчивый гладкий спектр суперконтинуума в области 1.06 мкм.

$0.07 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-2}$. Указанная модификация позволила уверенно проводить долговременные измерения и устойчиво получать хорошие результаты при больших временах усреднения.

Выходным радиосигналом синтезатора, формируемым при регистрации оптического излучения на фотоприемнике (см. рис.1), является непрерывная последовательность импульсов пикосекундной длительности со стабилизированной частотой следования. Спектр непрерывной последовательности импульсов представляет собой гребенку радиочастот с интервалом, равным частоте следования импульсов (рис.4,а), и шириной, определяемой полосой фотоприемника, в нашем случае 10 ГГц (DSC50S, Discovery Semiconductors). Любая компонента спектра может быть использована в качестве выходного сигнала синтезатора. Необходимо учесть, что мощность сигнала распределяется по всем компонентам спектра, и из-за относительно невысокой частоты следования импульсов волоконного генератора сложно получить требуемое отношение сигнал/шум на отдельно выделенной компоненте. Простое увеличение мощности излучения приводит к насыщению фотоприемника. Проблема, связанная с насыщением, решается путем применения высоколинейного фотоприемника и внерезонаторного умножения частоты следования фемтосекундных импульсов, в результате которого происходит прореживание радиочастотного спектра с перераспределением энергии между компонентами [22].

В настоящей работе для повышения частоты следования импульсов (с соответствующим уменьшением энергии отдельного импульса) и прореживания спектра излу-

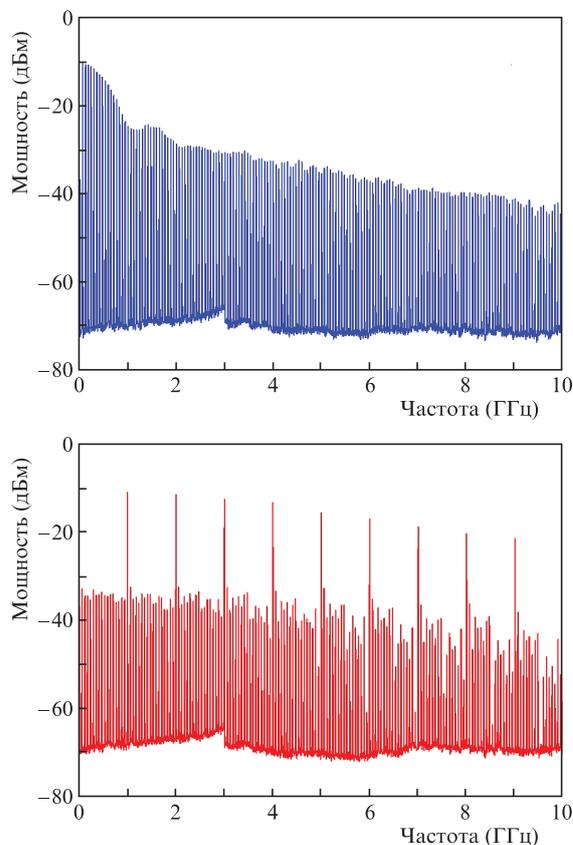


Рис.4. Спектры радиосигнала на выходе фотодетектора без оптической фильтрации (а) и с оптической фильтрацией (б). Полоса анализатора спектра 1 МГц.

чение фемтосекундного эрбиевого лазера пропускать через четыре волоконных интерферометра Маха–Цендера (см. рис.1). В качестве выходных частот синтезатора для дальнейшего его применения требовались гармоники, кратные частоте 1.0 ГГц, в нашем случае – кратные 17-й гармонике частоты следования импульсов. Максимально эффективная фильтрация достигается для 16-й гармоники, но выбор 17-й гармоники позволил использовать имеющийся фемтосекундный лазер без существенных конструктивных изменений. Фильтрация достигалась выбором соответствующих задержек в плечах интерферометров Маха–Цендера. Из-за того что номер выделяемой гармоники не кратен 16, величина подавления остальных гармоник частоты следования импульсов лазера не превышала 24 дБ. Прореженный спектр после каскада волоконных интерферометров представлен на рис.4,б. В результате этой процедуры уменьшилось насыщение фотоприемника и возросла мощность выделяемых (кратных частоте 1.0 ГГц) гармоник радиочастотного спектра, что привело к увеличению отношения сигнал/шум не менее чем на 20 дБ.

3. Сравнение сигналов двух синтезаторов

Собственная нестабильность выходной частоты фемтосекундного синтезатора определялась путем прямого сравнения двух независимых идентичных систем. Частоты следования импульсов фемтосекундных лазеров, входящих в состав систем, различались примерно на 120 Гц. Схема эксперимента (рис.5) аналогична схеме работы [17], где на входы двух синтезаторов подавались сигналы двух гетеродинных лазеров, «привязанных» к одному стабилизированному He–Ne/CH₄-лазеру. Настоящий эксперимент отличается тем, что на выходе фемтосекундного

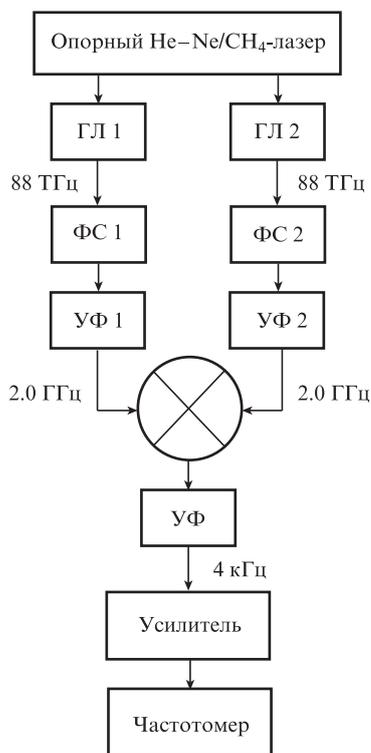


Рис.5. Схема эксперимента: ГЛ – гетеродинный лазер; ФС – фемтосекундный синтезатор; УФ – узкополосный фильтр.

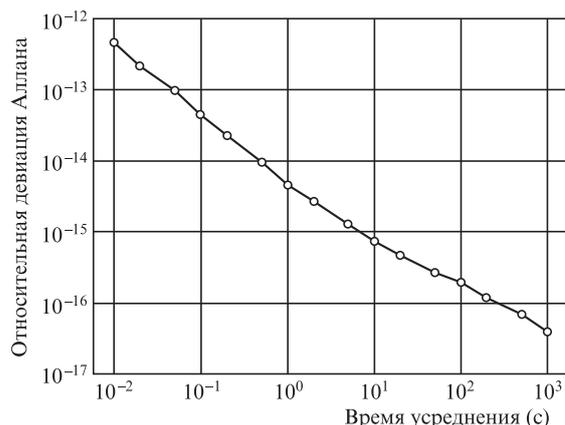


Рис.6. Относительная девиация Аллана выходной частоты 2 ГГц фемтосекундного синтезатора.

лазера размещаются эрбиевый усилитель и волоконный множитель частоты следования импульсов. В качестве выходного сигнала синтезатора использовалась 2-я гармоника умноженной частоты (2.0 ГГц, или 34-я гармоника частоты следования импульсов фемтосекундного эрбиевого лазера), выделенная узкополосным фильтром. Далее сигналы двух синтезаторов усиливались и подавались на смеситель. Разностная частота 4 кГц после усиления и фильтрации (полоса фильтра 200 Гц) измерялась частотомером HP53132A. По результатам измерений определялась собственная нестабильность фемтосекундных эрбиевых синтезаторов. Поскольку опорным источником стабильной частоты для двух синтезаторов служил один и тот же He–Ne/CH₄-лазер, то вкладом его собственной нестабильности можно пренебречь.

Нестабильность выходной частоты 2 ГГц (девиация Аллана) фемтосекундного эрбиевого синтезатора в пересчете на одну систему представлена на рис.6. Пересчет проведен в предположении, что две системы являются независимыми и одинаковыми. Каждой точке на кривой девиации Аллана соответствует своя серия данных с числом отсчетов не менее 80 для времен усреднения, больших 100 с. Так, серия с временем усреднения 1000 с имеет 82 отсчета измеряемой частоты, т.е. измерения длились практически сутки.

По сравнению с предыдущим вариантом фемтосекундного эрбиевого синтезатора [17] достигнуто значительное уменьшение относительной девиации Аллана, составившей в настоящем эксперименте 5×10^{-15} при времени усреднения 1 с.

4. Заключение

На основе волоконного фемтосекундного эрбиевого лазера создан синтезатор радиочастот в диапазоне 1–10 ГГц. Продемонстрирована устойчивая суточная работа синтезатора без сбоев частоты. Собственная нестабильность (девиация Аллана), измеренная на выходной частоте 2 ГГц, составляет 5×10^{-15} при времени усреднения 1 с. Это значение на порядок меньше приведенного в работе [17]. Полученная нестабильность фемтосекундного синтезатора радиочастот меньше нестабильности оптической частоты He–Ne/CH₄-стандарта и не препятствует достижению для метанового задающего генератора кратковременной нестабильности 1×10^{-14} ($\tau = 1$ с), что важно для его внелабораторных применений.

1. Hall J.L. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 1279 (2006).
2. Hänsch T.W. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 1297 (2006).
3. Udem T., Holzwarth R., Hänsch T.W. *Nature*, **416**, 233 (2002).
4. Diddams S.A., Jones D.J., Ye J., Cundiff S.T., Hall J.L., Ranka J.K., Windeler R.S., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5102 (2000).
5. Diddams S.A., Bartels A., Ramond T.M., Oates C.W., Bize S., Curtis E.A., Bergquist J.C., Hollberg L. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **9**, 1072 (2003).
6. Oelker E. et al. *Nat. Photonics*, **13**, 714 (2019).
7. Xie X. et al. *Nat. Photonics*, **11**, 44 (2017).
8. Milner W.R. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 173201 (2019).
9. Zhang W., Li T., Lours M., Seidelin S., Santarelli G., Le Coq Y. *Appl. Phys. B*, **106**, 301 (2012).
10. Zhang W., Seidelin S., Joshi A., Datta S., Santarelli G., Le Coq Y. *Opt. Lett.*, **39**, 1204 (2014).
11. Ghelfi P. et al. *Nature*, **507**, 341 (2014).
12. Sinclair L.C. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 151104 (2016).
13. Millo J., Abgrall M., Lours M., English E.M.L., Jiang H., Gúna J., Clairon A., Tobar M.E., Bize S., Le Coq Y., Santarelli G. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 141105 (2009).
14. Nand N.R., Hartnett J.G., Ivanov E.N., Santarelli G. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **59**, 2978 (2011).
15. Giunta M., Yu J., Lessing M., Fischer M., Lezius M., Xie X., Santarelli G., Le Coq Y., Holzwarth R. *Opt. Lett.*, **45**, 1140 (2020).
16. <http://www.menlosystems.com/products/ultrastable-microwaves/pmwg-1500/>.
17. Киреев А.Н. и др. *Квантовая электроника*, **46**, 1139 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1139 (2016)].
18. Шелковников А.С. и др. *Квантовая электроника*, **49**, 272 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 272 (2019)].
19. Gubin M.A., Kireev A.N., Tausenev A.V., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Tyurikov D.A., Shelkovnikov A.S. *Laser Phys.*, **17**, 1286 (2007).
20. Gubin M.A., Kireev A.N., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Shelkovnikov A.S., Tausenev A.V., Tyurikov D.A. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
21. Herrmann J., Griebner U., Zhavoronkov N., Husakou A., Nickel D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Korn G. *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 173901 (2002).
22. Haboucha A., Zhang W., Li T., Lours M., Luiten A.N., Le Coq Y., Santarelli G. *Opt. Lett.*, **36**, 3654 (2011).