



УДК 621.3.093 621.376.3

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ НА ЛИНИИ P(16) ИЗОТОПА АЦЕТИЛЕНА СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ ФАЗОМОДУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.Б. Даничев^а, Д.А. Шелестов^а, А.Б. Пнев^а

^а Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Адрес для переписки: alexanderdanichev@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.10.17, принята к печати 06.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-220-227

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Даничев А.Б., Шелестов Д.А., Пнев А.Б. Полупроводниковый стандарт частоты на линии P(16) изотопа ацетиленового со стабилизацией по температуре фазомодуляционным методом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 220–227. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-220-227

Аннотация

Рассмотрен метод стабилизации частоты излучения полупроводникового лазерного диода фазомодуляционным методом, выявлены критерии, влияющие на качество стабилизации, получены показатели девиации Аллана. Собрана экспериментальная установка, в основе которой лежат: полупроводниковый диод с распределенной обратной связью, волоконный фазовый модулятор, электрический генератор сигналов, кювета с изотопом ацетиленового-13, фотоприемное устройство, синхронный детектор и персональный компьютер для обработки измерений. Фазомодулированное излучение лазерного диода после прохождения через газовую кювету содержит информацию о положении спектральной линии излучения относительно центра одной из линий поглощения газа. Молекулярные линии газа обеспечивают эталон частоты с низкой чувствительностью к внешним воздействиям. С помощью опорного сигнала генератора на выходе синхронного детектора можно получить сигнал ошибки, который используется для управления длиной волны лазерного источника посредством изменения его температуры. Рассчитаны показатели девиации Аллана для частоты лазерного диода. Показано, что при помощи базового метода с контуром на основе температуры можно улучшить долговременную стабильность в области 0,1–100 с до $1 \cdot 10^{-8}$ (девиация Аллана). Данный метод стабилизации может быть использован при построении компактных стандартов оптической частоты повышенной надежности для космических применений.

Ключевые слова

фазомодуляционный метод, стабилизация частоты лазерного диода, полупроводниковый лазерный диод, фазовая модуляция, линия поглощения газа

SEMICONDUCTOR FREQUENCY STANDARD BASED ON P(16) SPECTRAL LINE OF ACETYLENE ISOTOPE WITH TEMPERATURE STABILIZATION BY PHASE MODULATION

А.Б. Danichev^а, D.A. Shelestov^а, A.B. Pnev^а

^а Scientific Educational Centre “Photonics and IR Engineering”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: alexanderdanichev@gmail.com

Article info

Received 05.10.17, accepted 06.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-220-227

Article in Russian

For citation: Danichev A.B., Shelestov D.A., Pnev A.B. Semiconductor frequency standard based on p(16) spectral line of acetylene isotope with temperature stabilization by phase modulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 220–227 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-220-227

Abstract

This paper reviews the method of semiconductor laser diode frequency stabilization by phase modulation. Also parameters are identified that affect the quality of stabilization and the estimation of Allan deviation is obtained. The pilot setup has been put together and it consists of: a semiconductor distributed feedback laser diode, a fiber phase modulator, an electrical signal generator, an acetylene-13 isotope cuvette, a photodetector, a lock-in amplifier and personal computer for measurement processing. Modulated laser diode radiation passed through a gas cell provides information about the position of radiation

spectral line relative to the center of gas spectral line. Gas molecular spectral lines provide frequency standard with low sensitivity to external effects. When using the reference signal, one can get an error signal in a lock-in amplifier that changes the laser diode temperature and, as a result, its wavelength. Allan deviation was estimated based on measured frequency data. Long-term stability can be improved in the time range between 0.1 s and 100 s up to $1 \cdot 10^{-8}$ (Allan deviation). This method of stabilization is useful for the development of compact high reliable optical frequency standards for space applications.

Keywords

phase modulation method, laser diode frequency stabilization, semiconductor laser diode, phase modulation, gas absorption line

Введение

Стандарты частоты в области 1,5 мкм имеют широкое применение в областях метрологии, волоконных сенсорных систем, а также являются объектами интереса в оптических системах связи и дальнометрии. Исследования оптических стандартов частоты в области 1,5 мкм тесно связаны с наблюдением спектра поглощения молекул ацетилена и, в частности, его изотопа $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$, спектральный атлас для которого был составлен в Национальной физической лаборатории (NPL) в 2005 г. [1]. В 2001 г. Международный комитет весов и мер (СIPM) предложил использование частоты линии P(16) изотопа $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ($194369569,4 \pm 0,1$ МГц) в качестве реперной в телекоммуникационной спектральной области. В 2005–2007 годах Совет по определению длины (Consultative Committee for Length, CCL) при Международном бюро мер и весов (BIPM) выпустил рекомендации, согласно которым частота линии P(16) предпочтительна для построения рабочего стандарта единицы длины и вторичного стандарта единицы времени [2]. Стандарт регламентирует сам метод захвата спектральной линии, а также параметры газа – температуру, давление, плотность мощности. После этого по всему миру начались интенсивные работы по построению ацетиленовых рабочих стандартов частоты в различных вариантах (таблица).

Основные источники лазерного излучения на 1,5 мкм – это лазерные диоды (ЛД) (с распределенной обратной связью (РОС) [4, 5, 8, 9] и с внешним резонатором [5–7], а также с дополнительным резонатором на шепчущих модах [11]), волоконные эрбиевые лазеры [10] и твердотельный Er-Yb лазер [3]. В каждом из случаев были показаны высокие для рабочего стандарта частоты результаты. Техника захвата у разных стандартов схожа и определяется в большей степени конструкцией кюветы: самые простые, однопроходовые, не требуют управления, а с пьезоэлементом требуется дополнительный источник модуляции. Заметим, что все использованные схемы основаны на частотно- (или фазо-) модуляционном способе, опережающем немодуляционные способы захвата линий [12]. Одиночный полупроводник с использованием шепчущих мод демонстрирует наивысшую собственную стабильность, однако без газовой кюветы для него характерен спад стабильности после 100 с. Отдельное современное направление представляют фотонно-кристаллические волокна, заполненные реперным газом – с ними можно удлинить область взаимодействия излучения с газом без увеличения размеров установки.

Конкуренцию ацетиленовым стандартам составляют телекоммуникационные стандарты на спектральных линиях йода. Несмотря на то, что у йода непосредственно в 1,5 мкм линии отсутствуют, посредством умножения частоты возможен переход в другой диапазон и такие результаты были показаны (девиация Аллана [$\tau=1$ с] от 1×10^{-14} до 5×10^{-14}) в ближней инфракрасной области [13–15].

В данной работе рассмотрена базовая методика частотного захвата спектральной линии [16, 17] на основе РОС лазерного диода, электрооптического модулятора, стандартной кюветы изотопа ацетилена-13 и синхронного детектора – наиболее простой и надежный способ построения рабочих стандартов частоты 1,5 мкм для космических применений.

Описание метода

Суть фазомодуляционного метода стабилизации заключается в следующем. В основе схемы стабилизации лежит DFB (distributed feedback) полупроводниковый ЛД. Чтобы обеспечить высокую стабильность частоты, используется захват линии поглощения P(16) изотопа ацетилена-13. Молекулярные линии газа обеспечивают эталон частоты с низкой чувствительностью к внешним воздействиям. В оптический спектр лазерного диода с помощью внешнего фазового модулятора, который управляется электрическим генератором сигналов, добавляются боковые линии для сканирования линии поглощения газа. Сравнивая опорный сигнал с генератора и сигнал с фотодетектора после газовой кюветы, синхронный детектор выделяет сигнал ошибки. Затем через обратную связь сигнал ошибки используется для управления температурой ЛД. Активным элементов теплоотвода является встроенный элемент Пельтье, работающий в полосе не более 10 Гц [18]. Таким образом, частота излучения лазера зафиксирована на центре линии поглощения. Структурно-функциональная схема установки представлена на рис. 1.

В зависимости от положения линии излучения относительно линии поглощения газа возможны следующие случаи.

- Максимум излучения находится вне линии. В таком случае преобразования фазовых колебаний не происходит, и на выходе – постоянный по амплитуде сигнал.

- Максимум излучения – на линии. На выходе – модулированный по амплитуде сигнал, который может быть преобразован в сигнал ошибки.
- Максимум излучения – на центре линии. Боковые частоты одинаковы по величине, преобразования не происходит. Это соответствует нулевому сигналу ошибки.

№	Публикация	Тип лазера	Тип/особенности газовой кюветы	Страна, организация	Год	Показанная девиация Аллана ($\tau=1$ с)
1	194 369 569.4(5) MHz Optical Frequency Standard Based on $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ P(16) Saturated Line [3]	Твердотельный Er-Yb лазер	Многопроходовая кювета с резонатором Фабри-Перо и пьезоэлементом	Italy, Politecnico di Milano Japan, National Metrology Institute of Japan (NMIJ)	2002	2×10^{-10}
2	Development of a compact 1.54 μm acetylene standard at NPL [4]	РОС ЛД	Однопроходовая кювета ($P = 3$ Па)	UK, NPL	2008	1×10^{-11} (не подтверждена)
3	Modulation-free acetylene-stabilized lasers at 1542 nm using modulation transfer spectroscopy [5]	ЛД с внешним резонатором, РОС ЛД	Многопроходовая кювета ($P=4$ Па)	Japan, Institute for Laser Science, University of Electro-Communications	2005	4×10^{-11}
4	Fiber-Based Acetylene-Stabilized Laser [6]	ЛД с внешним резонатором, волоконный лазер	Однопроходовая кювета с пьезоэлементом	Finland, Centre for Metrology and Accreditation	2009	5×10^{-12}
5	Absolute-Frequency Measurement of an Acetylene-Stabilized Laser Locked to the P(16) Transition of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ Using an Optical-Frequency Comb [7]	ЛД с внешним резонатором	Многопроходовая кювета с резонатором Фабри-Перо и пьезоэлементом	Korea, Pusan National University and Korea Research Institute of Standards and Science	2007	$4,2 \times 10^{-12}$
6	High performances frequency-stabilized semiconductor laser metrology sources for space-borne spectrometers [8]	РОС ЛД	Однопроходовая кювета	Canada, Teraxion Inc.	2006	1×10^{-10}
7	Absolute frequency measurement of wavelength standard at 1542nm: acetylene stabilized DFB laser [9]	РОС ЛД	Двухпроходовая кювета	Czech Metrology Institute (CMI), Laboratories of Fundamental Metrology, Czech Republic	2005	8×10^{-12}
8	Optical frequency standard using acetylene-filled hollow-core photonic crystal fibers [10]	Волоконный лазер	Кювета – полный фотонно-кристаллический световод	Denmark, Danish Fundamental Metrology, Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark	2015	2×10^{-12}
9	Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser [11]	РОС ЛД с резонатором на шепчущих модах	Отсутствует	USA, OEwaves Inc.	2015	3×10^{-12}

Таблица. Основные работы по ацетиленовым стандартам частоты (линия P16)

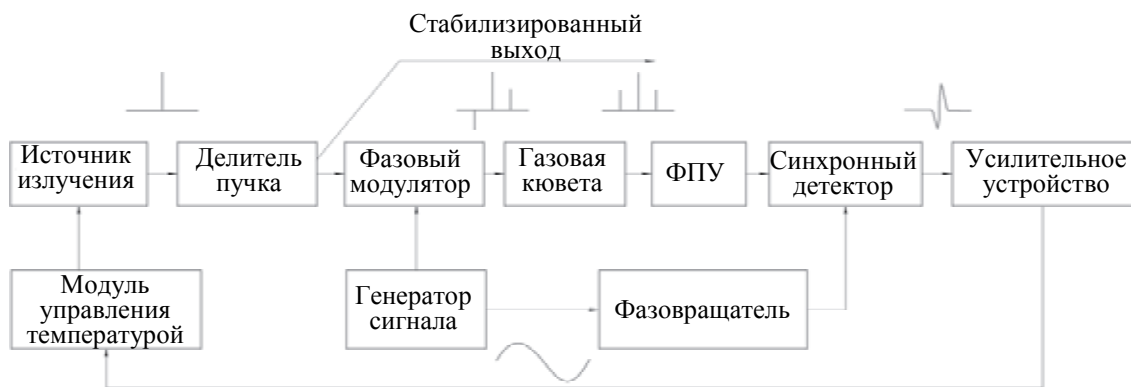


Рис. 1. Структурно-функциональная схема установки (ФПУ – фотоприемное устройство)

Эксперимент

В качестве источника излучения был использован ЛД с распределенной обратной связью EP1550-S44-935-SBAA с платой управления температурой и током DioDrive Uno и возможностью ручной подстройки длины волны посредством установки рабочей точки контура регулирования температуры на основе элемента Пельтье, встроенного в лазерный модуль. Установка температуры производится дискретно через персональный компьютер (ПК). Диапазон перестройки длины волны – от 1541,661 до 1542,399 нм. Шаг перестройки составил 70 фм. Центр линии поглощения (P16) ацетилена-13 находится на длине волны 1542,386 нм, ширина линии – 20 пм, так что можно утверждать, что эта линия попадает в диапазон перестройки длины волны ЛД.

Затем установлен оптический разветвитель конфигурации 1×2 с коэффициентом разветвления 50/50. Одна ветвь используется в контуре стабилизации, а другая является стабилизированным выходом установки.

В качестве модулятора был выбран фазовый модулятор Thorlabs LN65S-FC. На модулятор подается периодический синусоидальный сигнал с генератора с частотой 30 МГц и амплитудой 3,5 В, равной полуволновому напряжению для модулятора. В итоге на выходе волоконного фазового модулятора мы получаем сигнал с неизменной амплитудой и модулированной по синусоиде фазой, которая будет «сканировать» линию поглощения газа.

В качестве частотного дискриминатора используется стандартная газовая ячейка изотопа ацетилена-13 Wavelength References. Была использована кювета в волоконном исполнении, т.е. диаметр пучка задан параметрами волокна. Длина кюветы – 58 см – определяется балансом между амплитудой линии и общими потерями. Глубина выбранной линии P16 составила 3 дБ. Температура кюветы – комнатная (294 К), давление – 6,7 кПа, что отличается от рекомендаций стандарта (3 Па). На рис. 2 изображена целевая спектральная линия при различных давлениях и прочих равных параметрах. Видно, что используемая кювета не оптимальна по давлению, так как линия расширяется с ростом давления, причем количественно уширение $\delta\nu_2/\delta\nu_1$ составило 1,6 раза. Оценка была сделана посредством базы данных HITRAN (High-resolution transmission molecular absorption database – HITRAN Online www.hitran.org).

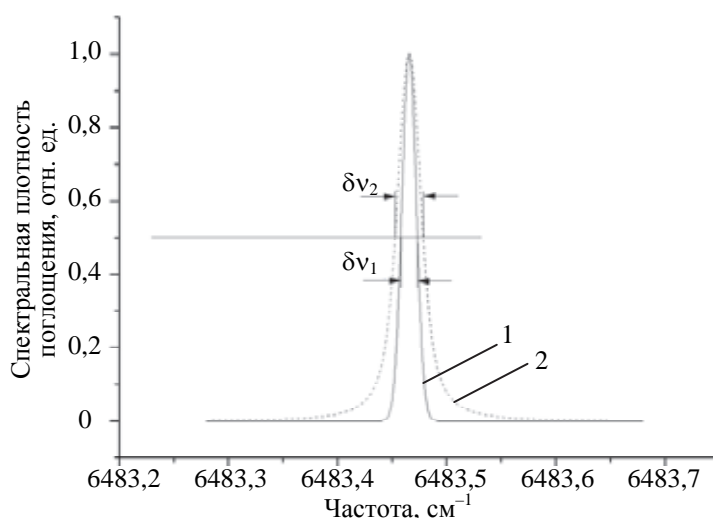


Рис. 2. Модель спектральной линии ацетилена P(16) при давлении 3 Па и 6,7 кПа (1 – 3 Па, 2 – 6,7 кПа)

Фотоприемное устройство Femto Photoreceiver HCA-S-200M-IN – традиционный квадратичный приемник излучения, нечувствительный к фазе колебаний. В данной схеме он регистрирует присутствие частоты модуляции в сигнале, что характеризует положение пика спектра излучения относительно центра поглощения газа.

В качестве синхронного детектора был выбран цифровой прибор Zurich Instruments HF2LI Lock-in Amplifier. Частотная избирательность детектора определяется полосой пропускания фильтра низких частот и может быть сделана очень высокой, трудно достижимой путем прямой фильтрации сигнала. Таким образом, синхронный детектор обладает свойствами, важными для обработки сигналов, такими как чувствительность к фазе и амплитуде измеряемого сигнала, высокая частотная избирательность. Для получения максимального контраста на выходе, необходимо выровнять амплитуды опорного сигнала с генератора и измеряемого сигнала с фотодетектора, а также подобрать фазу опорного сигнала, чтобы входные воздействия были синфазными либо противофазными. Так как элемент Пельтье, на который будет поступать управляющий сигнал, достаточно инертен, с помощью низкочастотного фильтра полоса результирующего сигнала ограничивается до 10 Гц.

В результате на выходе получаем сигнал ошибки, характеризующий положение максимума излучения относительно центра поглощения.

Полученный сигнал ошибки оптимизируется в усилительном устройстве по амплитуде и знаку для подключения к драйверу лазера. Функционально усилительное устройство состоит из входного каскада (50 Ом) и сумматора, который объединяет сигналы управления с ПК и синхронного детектора.

Анализ результатов

Установка может работать в двух режимах:

1. режим стабилизации, когда контур обратной связи замкнут;
2. режим просмотра, когда контур обратной связи разомкнут и за счет сканирования температуры в заданных границах выход синхронного детектора прописывает дискриминационную кривую.

Режим просмотра позволяет визуализировать спектральную линию и зафиксировать ее параметры. На графике (рис. 3) представлена статистика дискриминационных кривых поглощения газовой ячейки. Параметры модуляции задаются синхронным детектором, в который встроен генератор и фазовращатель. Ввиду того, что устройство полностью цифровое, частоты обработки невысоки – не более 30 МГц. Такое ограничение представляет определенный интерес для изучения, так как в случае получения приемлемой стабильности на 30 МГц и ниже, можно использовать в схеме существенно более простые и надежные модуляторы, нежели электрооптический модулятор. В работе при ширине линии $\delta\nu$, равной 600 МГц, использована частота модуляции $\omega_m=30$ МГц, что соответствует условному параметру модуляции $\Delta R=\omega_m/(\delta\nu/2)$, равному 0,1 [16]. Такая величина существенно снижает дискриминационные свойства используемого репера, но по вышеуказанным причинам является актуальной.

Дискриминационный коэффициент составил 3×10^{-4} В/МГц, хотя его значение может сильно изменяться параметрами цифрового синхронного детектора. Полученное значение является оптимальным с точки зрения самовозбуждения контура.

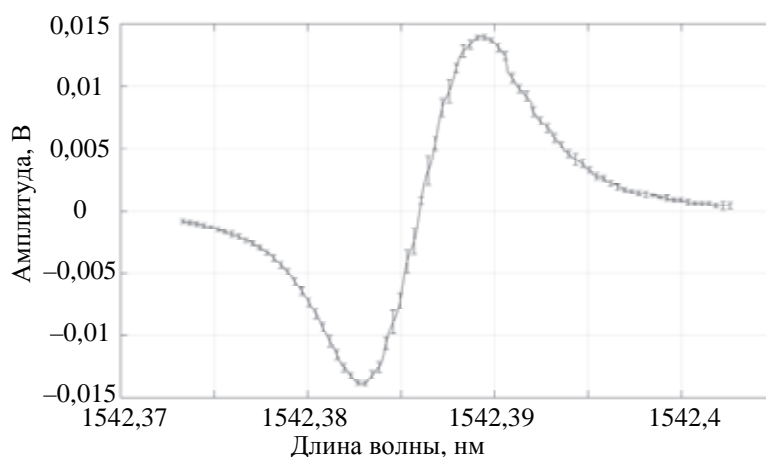


Рис. 3. Статистика дискриминационных кривых поглощения линии P(16) (сплошная линия – среднее, отрезки – среднеквадратическое отклонение в выбранных точках)

Итоговые данные были получены при помощи измерителя длины волны Angstrom WSU6, имеющего погрешность измерения в области 1,5 мкм на уровне 2 МГц при максимальной частоте опроса 100 Гц. Длина волны была измерена в режиме стабилизации (рис. 5) и без него (рис. 4). Визуальное сравнение показывает, что кратковременное поведение лазера изменилось в 2 раза: ± 20 МГц без стабилизации

против ± 10 МГц со стабилизацией, но это не основной эффект, так как контур температуры – низкочастотный (менее 10 Гц) и практически не работает на кратковременных интервалах. Ключевой эффект – исчезновение дрейфов средней длительности. Эти особенности наглядно проявились на графиках девиации Аллана (рис. 6) для относительного значения частоты (безразмерная величина $\delta\nu/\nu$), рассчитанных на основе приведенных исходных данных.

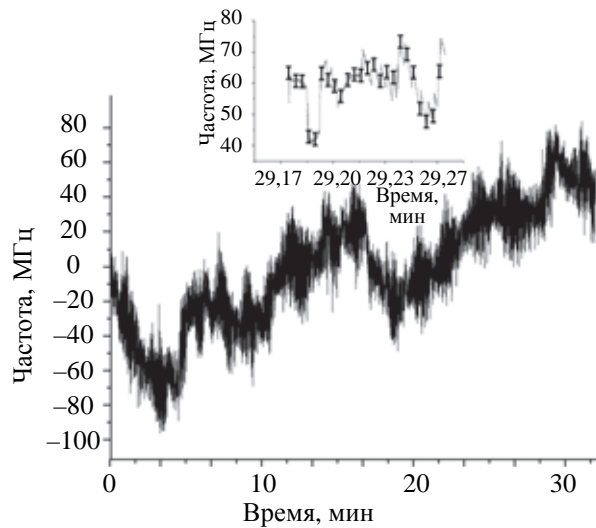


Рис. 4. Измерение частоты нестабилизированного лазерного диода (на вставке показана погрешность измерителя длины волны)

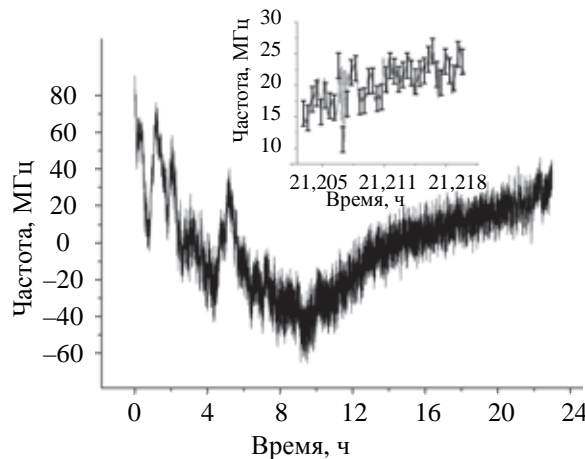


Рис. 5. Измерение частоты лазерного диода, стабилизированного по ацетилену (на вставке показана погрешность измерителя длины волны)

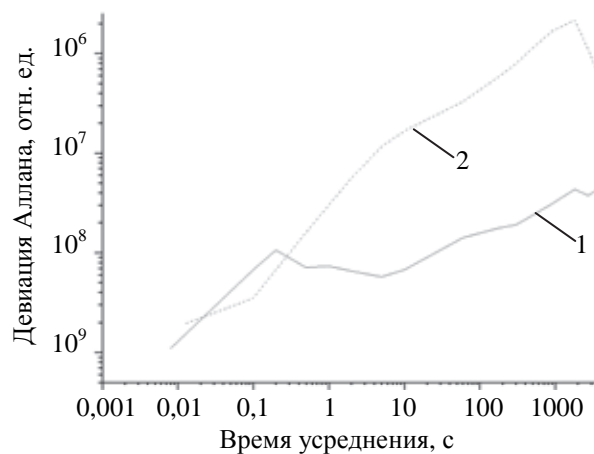


Рис. 6. Девиация Аллана (1 – стабилизирован, 2 – не стабилизирован)

Измерения воспроизводились несколько раз в пределах недели, и была замечена чувствительность установки к температуре окружающей среды, выражающаяся в смещении центральной частоты захвата, однако стабильность оставалась прежней. Так как абсолютное значение длины волны не имеет принципиального значения для хранителей частоты, эта обнаруженная зависимость отдельно не исследовалась. Сравнение девиаций наглядно подтверждает область эффективной работы контура стабилизации для данной установки – от 0,1 с до 100 с, в пределах которой девиация не поднимается выше 1×10^{-8} . Возрастание девиации на промежутках более 100 с связано с особенностями работы драйвера лазера, который оптимизирован для высоких и средних частот и не учитывает смещение рабочей точки с частотой 0,01 Гц и ниже. В отсутствии стабилизации девиация Аллана за тот же период времени снижается на 2 порядка – до 2×10^{-6} .

Заключение

Полученный результат является первым шагом к созданию собственного портативного рабочего стандарта частоты на основе ацетилена. Была продемонстрирована работа контура стабилизации и подтверждена эффективная полоса работы элемента Пельтье даже при сниженной частоте модуляции. Проанализированные в процессе работы эффекты будут использоваться в новых версиях установки.

Кратковременная стабильность определяется в первую очередь шириной полосы лазерного источника, а также полосой контура регулирования тока накачки, а далее, на долговременном промежутке основную роль уже играет температура кристалла. В связи с этим для улучшения работы установки на кратковременном промежутке работы планируется разделить сигнал ошибки на две компоненты, высокочастотную (более 10 Гц) и низкочастотную (ниже 10 Гц), для регулирования тока и температуры соответственно. Для устранения долговременного дрейфа планируется специальная оптимизация используемого драйвера лазерного диода для работы по постоянному сигналу. Также планируется оптимизация опрашиваемой кюветы с целью приведения параметров линии к рекомендуемым.

Литература

1. Edwards C.S., Margolis H.S., Barwood G.P. et al. High-accuracy frequency atlas of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ in the 1.5 μm region // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2005. V. 80. N 8. P. 977–983. doi: 10.1007/s00340-005-1851-0
2. Felder R. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2003) // *Metrologia*. 2005. V. 42. N 4. P. 323–325. doi: 10.1088/0026-1394/42/4/018
3. Svelto C. et al. 194 369 569.4(5) MHz optical frequency standard based on $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ p(16) saturated line // *Proc. 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Anchorage, USA, 2002. V. 1. P. 69–72.
4. Edwards C.S., Patel P., Barwood G.P., Gill P. Development of a compact 1.54 μm acetylene standard at NPL // *Proc. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*. Broomfield, USA, 2008. P. 294–295. doi: 10.1109/CPEM.2008.4574769
5. Nakagawa K., Sato Y., Musha M., Ueda K. Modulation-free acetylene-stabilized lasers at 1542 nm using modulation transfer spectroscopy // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2005. V. 80. N 4-5. P. 479–482.
6. Ahtee V., Merimaa M., Nyholm K. Fiber-based acetylene-stabilized laser // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009. V. 58. N 4. P. 1211–1216. doi: 10.1109/TIM.2008.2008476
7. Moon H.S., Lee W.K., Suh H.S. Absolute-frequency measurement of an acetylene-stabilized laser locked to the P(16) transition of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ using an optical-frequency comb // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007. V. 56. N 2. P. 509–512. doi: 10.1109/TIM.2007.891056
8. Latrasse C., Pelletier F., Doyle A., Savard S., Babin A. et al. High performances frequency-stabilized semiconductor laser metrology sources for space-borne spectrometers // *Proceedings of SPIE*. 2006. V. 10567. doi: 10.1117/12.2308112
9. Balling P., Fischer M., Kubina P., Holzwarth R. Absolute frequency measurement of wavelength standard at 1542nm: acetylene stabilized DFB laser // *Optics Express*. 2005. V. 13. N 23. P. 9196–9201. doi: 10.1364/OPEX.13.009196
10. Triches M., Michieletto M., Hald J., Lyngso J.K., Lægsgaard J., Bang O. Optical frequency standard using acetylene-filled hollow-core photonic crystal fibers // *Optics Express*. 2015. V. 23. N 9. P. 11227–11241. doi: 10.1364/OE.23.011227
11. Liang W., Ilchenko V.S., Eliahu D. et al. Ultralow noise

References

1. Edwards C.S., Margolis H.S., Barwood G.P. et al. High-accuracy frequency atlas of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ in the 1.5 μm region. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2005, vol. 80, no. 8, pp. 977–983. doi: 10.1007/s00340-005-1851-0
2. Felder R. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2003). *Metrologia*, 2005, vol. 42, no. 4, pp. 323–325. doi: 10.1088/0026-1394/42/4/018
3. Svelto C. et al. 194 369 569.4(5) MHz optical frequency standard based on $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ p(16) saturated line. *Proc. 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Anchorage, USA, 2002, vol. 1, pp. 69–72.
4. Edwards C.S., Patel P., Barwood G.P., Gill P. Development of a compact 1.54 μm acetylene standard at NPL. *Proc. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*. Broomfield, USA, 2008, pp. 294–295. doi: 10.1109/CPEM.2008.4574769
5. Nakagawa K., Sato Y., Musha M., Ueda K. Modulation-free acetylene-stabilized lasers at 1542 nm using modulation transfer spectroscopy. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2005, vol. 80, no. 4-5, pp. 479–482.
6. Ahtee V., Merimaa M., Nyholm K. Fiber-based acetylene-stabilized laser. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 1211–1216. doi: 10.1109/TIM.2008.2008476
7. Moon H.S., Lee W.K., Suh H.S. Absolute-frequency measurement of an acetylene-stabilized laser locked to the P(16) transition of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ using an optical-frequency comb. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, vol. 56, no. 2, pp. 509–512. doi: 10.1109/TIM.2007.891056
8. Latrasse C., Pelletier F., Doyle A., Savard S., Babin A. et al. High performances frequency-stabilized semiconductor laser metrology sources for space-borne spectrometers. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 10567. doi: 10.1117/12.2308112
9. Balling P., Fischer M., Kubina P., Holzwarth R. Absolute frequency measurement of wavelength standard at 1542nm: acetylene stabilized DFB laser. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 23, pp. 9196–9201. doi: 10.1364/OPEX.13.009196
10. Triches M., Michieletto M., Hald J., Lyngso J.K., Lægsgaard J., Bang O. Optical frequency standard using acetylene-filled hollow-core photonic crystal fibers. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 9, pp. 11227–11241. doi: 10.1364/OE.23.011227

- miniature external cavity semiconductor laser // *Nature Communications*, 2015, V. 6, Art. 7371. doi: 10.1038/ncomms8371
12. Шелестов Д.А., Долонов И.А., Кошелев К.И., Пнев А.Б. Хранитель частоты на линии P(16) $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ для космического применения // V Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Москва, МИФИ, 2016. С. 69–70.
 13. Schuldt T., Doringshoff K., Milke A. et al. High-performance optical frequency references for space // *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, V. 723, N 1, Art. 012047. doi: 10.1088/1742-6596/723/1/012047
 14. Philippe C., Holleville D., Le Targat R., Wolf P., Leveque T., Goff R.Le, Martaud E., Acef O. A compact frequency stabilized telecom laser diode for space applications // *Proceedings of SPIE*, 2017, V. 10562. doi: 10.1117/12.2296121
 15. Philippe C., Le Targat R., Holleville D. et al. Frequency tripled 1.5 μm telecom laser diode stabilized to iodine hyperfine line in the 10–15 range // *Proc. 2016 European Frequency and Time Forum*, York, UK, 2016. doi: 10.1109/EFTF.2016.7477827
 16. Bjorklund C.C., Levenson M.D., Lenth W., Ortiz C. Frequency modulation (FM) spectroscopy - theory of lineshapes and signal-to-noise analysis // *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*, 1983, V. 32, N 3, P. 145–152. doi: 10.1007/BF00688820
 17. Drever R.W.P., Hall J.L., Kowalski F.V. et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*, 1983, V. 31, N 2, P. 97–105.
 18. Шелестов Д., Томилов С. Стабилизация длины волны излучения диодных лазеров. Динамические характеристики элементов Пельтье // *Фотоника*, 2016, № 4(58), С. 52–63. doi: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.52.63
 11. Liang W., Ilchenko V.S., Eliahu D. et al. Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, art. 7371. doi: 10.1038/ncomms8371
 12. Shelestov D.A., Dolonov I.A., Koshelev K.I., Pnev A.B. Keeper of frequency on the line P(16) $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ for space applications. *Proc. 5th All-Russian Conf. on Photonics and Information Optics*. Moscow, MPhI, 2016, pp. 69–70. (In Russian)
 13. Schuldt T., Doringshoff K., Milke A. et al. High-performance optical frequency references for space. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 723, no. 1, art. 012047. doi: 10.1088/1742-6596/723/1/012047
 14. Philippe C., Holleville D., Le Targat R., Wolf P., Leveque T., Goff R.Le, Martaud E., Acef O. A compact frequency stabilized telecom laser diode for space applications. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10562. doi: 10.1117/12.2296121
 15. Philippe C., Le Targat R., Holleville D. et al. Frequency tripled 1.5 μm telecom laser diode stabilized to iodine hyperfine line in the 10–15 range. *Proc. 2016 European Frequency and Time Forum*, York, UK, 2016. doi: 10.1109/EFTF.2016.7477827
 16. Bjorklund C.C., Levenson M.D., Lenth W., Ortiz C. Frequency modulation (FM) spectroscopy - Theory of lineshapes and signal-to-noise analysis. *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*, 1983, vol. 32, no. 3, pp. 145–152. doi: 10.1007/BF00688820
 17. Drever R.W.P., Hall J.L., Kowalski F.V. et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*, 1983, vol. 31, no. 2, pp. 97–105.
 18. Shelestov D., Tomilov S. Stabilization of wavelength of diode laser radiation. Dynamic characteristics of Peltier elements. *Photonics*, 2016, no. 4, pp. 52–63. (In Russian) doi: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.52.63

Авторы

Даничев Александр Борисович – инженер, Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-6761-2576, alexanderdanichev@gmail.com

Шелестов Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, Scopus ID: 55293612500, ORCID ID: 0000-0002-8965-8516, dima.shelestov@gmail.com

Пнев Алексей Борисович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, Scopus ID: 57195514871, ORCID ID: 0000-0002-7790-2796, apniiov@gmail.com

Authors

Alexander B. Danichev – engineer, Scientific Educational Centre “Photonics and IR Engineering”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-6761-2576, alexanderdanichev@gmail.com

Dmitry A. Shelestov – Junior researcher, Scientific Educational Centre “Photonics and IR Engineering”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, Scopus ID: 55293612500, ORCID ID: 0000-0002-8965-8516, dima.shelestov@gmail.com

Alexey B. Pnev – PhD, Associate Professor, Senior researcher, Scientific Educational Centre “Photonics and IR Engineering”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, Scopus ID: 57195514871, ORCID ID: 0000-0002-7790-2796, apniiov@gmail.com