

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 53.083

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-141-151

Способ обработки спектра излучения лазера на основе экспериментально записанной формы пропускания интерферометра Фабри – Перо*

К.Н. САВИНОВ^a, Н.Н. ГОЛОВИН^b, Л.Р. ДМИТРИЕВА^c, А.К. ДМИТРИЕВ^d,
Д.М. КОТИНА^e

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный техни-
ческий университет

^a k.n.savinov@yandex.ru ^b n.golovin@corp.nstu.ru ^c dmitrieva-leyla@mail.ru
^d alexander_dmitriev@ngs.ru ^e kotinadasha03@yandex.ru

В настоящее время для создания квантовых стандартов частоты широко используется явление когерентного плетения населенности (КПН), в котором при достижении определенной интенсивности и совпадении частотного интервала между спектральными компонентами с частотой сверхтонкого перехода в атоме (чаще всего в рубидии или цезии), наблюдается узкий резонанс в спектре поглощения, и пропускание ячейки с парами щелочного металла резко растет. Поскольку амплитуда КПН резонанса критически зависит от интенсивности и положения спектральных компонент излучения накачки, необходимо контролировать параметры этих компонент, записанных, как правило, в цифровом виде.

В настоящей работе описывается принципиально новый метод обработки зарегистрированного с помощью сканируемого интерферометра Фабри – Перо (ИФП) спектра излучения лазера, основанный на использовании в качестве эталонной спектральной компоненты экспериментально записанной формы пропускания сканируемого ИФП. В работе приведены примеры обработки экспериментально записанных спектров излучения диодного лазера с внешним резонатором при СВЧ-модуляции его тока инжекции. Погрешность обработки предложенным методом оказалась примерно на порядок меньше, чем при обработке широко известной формулой Эйри, описывающей пропускание ИФП. Это объясняется тем фактом, что формула Эйри справедлива для световых пучков, кривизна волнового фронта которых согласована с кривизной зеркал ИФП, что зачастую не выполняется в случае реального эксперимента.

Метод может использоваться для обработки спектров модулированного излучения различных типов лазеров, что является актуальной задачей при регистрации КПН резонансов и дальнейшем создании на их основе квантовых стандартов частоты.

Ключевые слова: диодный лазер, спектр излучения, обработка спектра, частотная модуляция, формула Эйри, КПН-резонанс, стандарт частоты, интерферометр Фабри – Перо

* Статья получена 02 марта 2023 г.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSUN-2023-0007.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка спектров является важной задачей для многих областей науки, таких как физика, астрофизика и др. Одной из основных задач данного типа является обработка спектров излучения лазера, используемых для накачки резонансов когерентного пленения населенности (КПН) [1, 2]. Стандарты частоты на основе КПН-резонанса, возникающего при взаимодействии оптического излучения с атомами щелочных металлов, обладают хорошей кратковременной стабильностью и могут быть использованы в системах связи, геолокации и других приложениях [3]. Световые сдвиги КПН-резонанса, которые влияют на стабильность стандарта частоты, зависят от разности амплитуд спектральных компонент, дающих вклад в накачку резонанса [4]. Таким образом, для регистрации КПН-резонансов и снижения световых сдвигов необходимо получение информации об амплитудах и частотах спектральных компонент источника накачки [5, 6].

Также задача обработки спектров излучения находит применение при исследовании спектральных характеристик диодных лазеров при модуляции тока инжекции [7, 8].

В работах [9–11] обработка спектров осуществляется с помощью использования функций Лоренца. В [10] было показано, что спектр поглощения хорошо аппроксимируется с использованием данной функции, однако стоит заметить, что спектр был получен с помощью переноса оптической частоты в радиодиапазон с последующим использованием преобразования Фурье. В [9] использовалась совокупность лоренцевских линий для аппроксимации спектров, записанных при помощи ИФП. При использовании зеркал с кривизной, близкой к форме волнового фронта излучения, возможно существенное увеличение точности записываемых спектров. С другой стороны, при помощи обработки совокупностью лоренцевских линий получается симметричный результат, в то время как экспериментальные данные обладают значительной асимметрией, что приводит к неточности в определении положения центральной части.

В [11] был предложен метод выделения пиков лоренцевской формы в спектре путем его интерполяции целочисленными сдвигами. Был выполнен расчет коэффициентов угловой функции, а также вычислены амплитуды составляющих компонент для тестовых сигналов. Данный метод обеспечивает хорошее качество восстановления исходного сигнала (погрешность порядка 0,1 %) в отсутствие шума, однако при наличии 5 %-го случайного шума, характерного для прикладных задач, границы применимости метода становятся значительно меньше. Таким образом, при работе с реальными сигналами необходимы дополнительные меры для обеспечения устойчивости вычислений.

В работах [12, 13] для ИФП предлагается использование формулы Эйри. Для ИФП с базой 2...5 мкм [12] наблюдается существенное расхождение экспериментального и теоретического сигналов вблизи центра спектральной компоненты. В [13] использование данной формулы предлагается для спектров после ИФП со сферическими зеркалами. Однако стоит заметить, что для осуществления корректной записи отдельных компонент спектра накладывается ряд дополнительных условий, что приводит к значительному усложнению обработки экспериментальных данных.

В [14] был предложен метод обработки спектра поглощения молекулы AgNO_3 с использованием гауссовой и лоренцевой линий. При этом результаты обработки с использованием гауссиана оказываются лучше во всех экспериментах. Гауссова функция также была использована в [15] для обработки спектров, записанных в широком диапазоне частот с помощью спектрофотометра СФ-56. Помимо этого, в указанной работе обработка спектров происходила и с использованием дифракционной функций. При этом результаты аппроксимации гауссовой функцией лучше, так как дифракционная функция обладает побочными максимумами, вследствие чего является непригодной для обработки сложных спектров, состоящих из нескольких компонент.

В настоящей работе предлагается метод обработки спектров излучения лазера, позволяющий более точно определить амплитуды и положения центральной и боковых спектральных составляющих.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В работе используется диодный лазер с внешним резонатором, представленным дифракционной решеткой. Подробное описание схемы лазера представлено в работе [7]. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

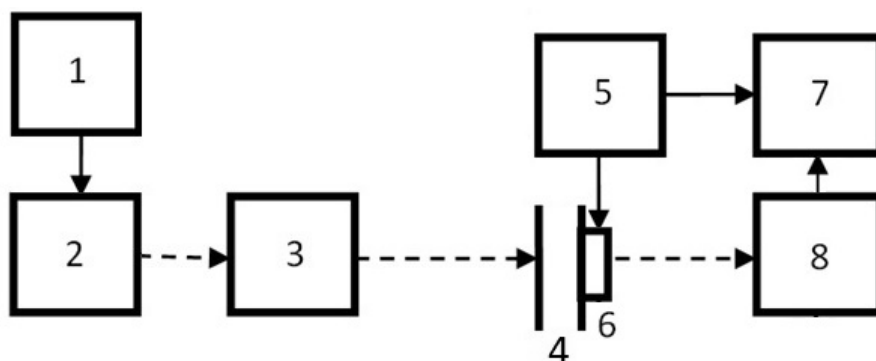


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – генератор сверхвысокочастотных сигналов; 2 – диодный лазер; 3 – оптический изолятор; 4 – интерферометр Фабри – Перо; 5 – генератор пилообразного напряжения; 6 – пьезокерамический преобразователь; 7 – цифровой осциллограф; 8 – фотоприемник

Fig. 1. A scheme of an experimental setup:

1 is a microwave oscillator; 2 is a diode laser; 3 is an optical insulator; 4 is the Fabry – Perot interferometer; 5 is a sawtooth voltage generator; 6 is a piezoceramic transducer; 7 is a digital oscilloscope; 8 is a photodetector

Излучение полупроводникового лазера (2) через оптический изолятор (3) подают на интерферометр Фабри – Перо (4), длину базы которого сканируют пилообразным напряжением от генератора (5), соединенного с пьезокерамическим преобразователем (6). Затем излучение поступает на фотоприемник (8), соединенный с цифровым осциллографом (7). Для синхронизации записываемого сигнала на другой канал осциллографа поступает сигнал от генератора пилообразного напряжения (5). Таким образом записывают эксперименталь-

ную форму пропускания интерферометра Фабри – Перо, используемую впоследствии для обработки спектров. Затем с помощью сверхвысокочастотного сигнала от генератора (1) модулируют ток инжекции полупроводникового лазера (2) и аналогичным образом записывают сложный спектр, обработку которого необходимо выполнить.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обработки спектров был применен принципиально новый подход, основой которого стала программа, написанная специально для этой цели с помощью среды Matlab. Процесс обработки состоит из нескольких этапов.

На первом этапе производилась запись функции пропускания используемого ИФП в окрестностях положения несущей и боковых компонент первого порядка. Запись при различных напряжениях сканирования применялась для минимизации влияния нелинейности пьезокерамики. Пример такой записи приведен на рис. 2.

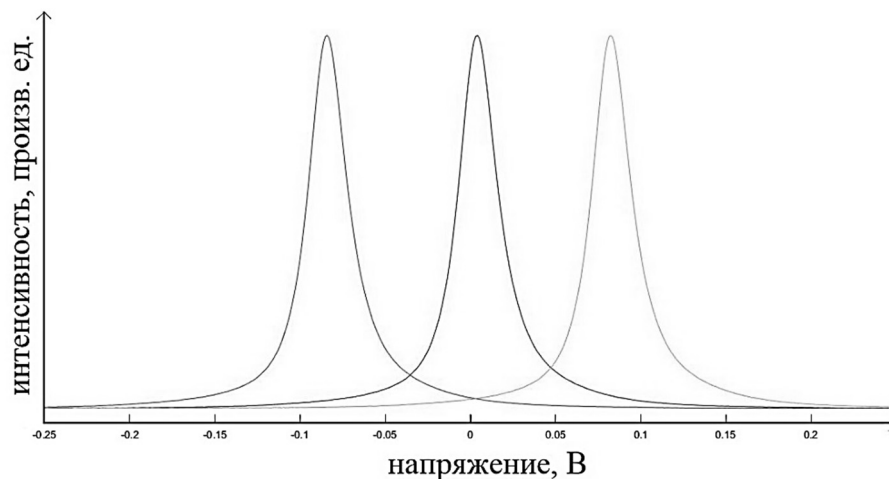


Рис. 2. Спектры излучения без модуляции, записанные возле центральной и боковых компонент

Fig. 2. Emission spectrum without modulation recorded near central and side bands

На втором этапе производилась запись спектров СВЧ-модулированного сигнала. При изменении различных параметров спектр менялся и появлялись более высокие порядки модуляции. В настоящей работе будет рассмотрен пример обработки спектра при модуляции частотой 3,5 ГГц.

На третьем этапе для каждого пика в обрабатываемом спектре лазера по методу наименьших квадратов были подобраны значения амплитуды и частотного положения форм пропускания, позволяющие при каждом значении по оси абсцисс минимизировать разницу между суммой этих форм и экспериментальным значением обрабатываемого спектра в этой точке. Таким образом, набор форм пропускания с различными амплитудами и положениями будет представлять собой истинный спектральный состав исследуемого излучения. Амплитуды и положения экспериментальных форм не будут совпадать с пи-

ками обрабатываемых спектров, поскольку после обработки будет учтено их взаимное влияние друг на друга и с обрабатываемым спектром будет совпадать лишь их поточечная сумма. На рис. 3 показана каждая из боковых компонент в отдельности и их суммарное распределение.

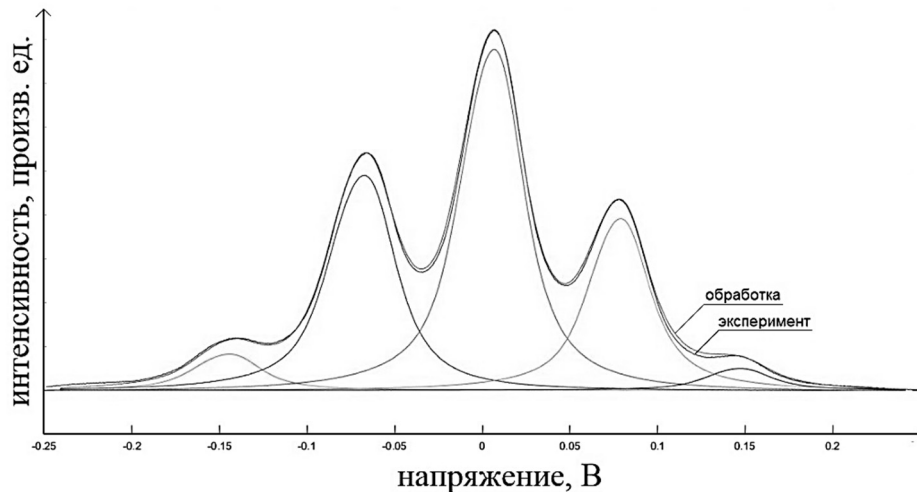


Рис. 3. Пример обработки сложного спектра при СВЧ-модуляции частотой 3,5 ГГц (экспериментально записанная и обработанная кривые)

Fig. 3. An example of composite spectrum processing under microwave modulation with frequency 3.5 GHz (an experimentally recorded curve and a processed one are marked)

Видно, что экспериментально записанный и обработанный спектр практически совпадают, что говорит о высокой точности метода. Некоторые расхождения наблюдаются только вблизи областей экстремума ($-0,04$ В и $0,12$ В по оси абсцисс). Однако эти области не несут практического значения, поскольку для работы со спектрами, как правило, необходимо получать информацию об амплитуде и положении пика спектральных компонент.

Для сравнения была выполнена обработка этого же спектра с помощью широко известной формулы Эйри для пропускания интерферометра Фабри – Перо:

$$T = \frac{I}{1 + F \sin^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda \cos \theta} \right)},$$

где T – пропускание интерферометра; I – интенсивность падающей волны; F – коэффициент остроты; d – зазор между входным и выходным зеркалами интерферометра; λ – длина волны падающего излучения; θ – угол падения светового луча на входное зеркало. В данном случае по методу наименьших квадратов были подобраны амплитуды компонент, частотное положение и коэффициент остроты интерферометра. Результат обработки представлен на рис. 4.

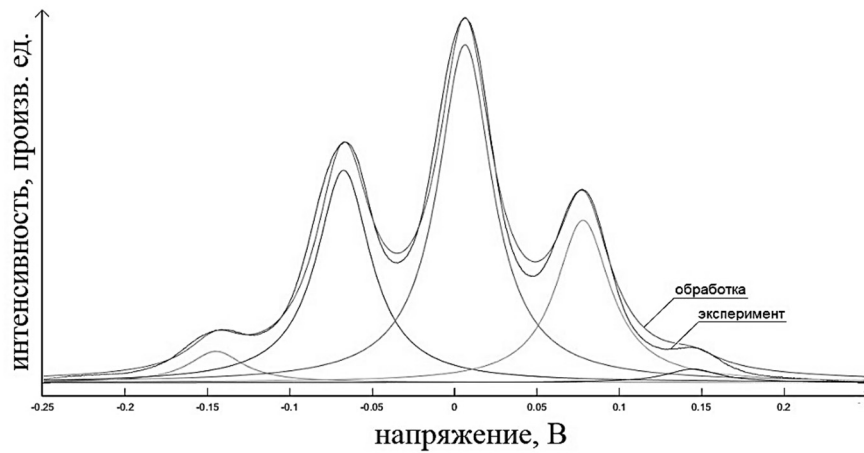


Рис. 4. Обработка сложного спектра с помощью функции Эйри (экспериментально записанная и обработанная кривые)

Fig. 4. Processing of a composite spectrum using the Airy function (an experimentally recorded curve and a processed one are marked)

Видно, что областей расхождения экспериментального и обработанного спектра существенно больше, чем на рис. 3, что говорит о существенной погрешности обработки.

Для более наглядной оценки точности была построена поточечная разность экспериментально записанного и обработанного двумя описанными методами спектра (рис. 5).

Для численной оценки точности была использована сумма квадратов значений разности, представленных на рис. 5. В случае обработки формулой Эйри сумма квадратов составляет 0,013, а при обработке предложенным методом – 0,0014, т. е. точность обработки предложенным методом выше примерно на порядок.

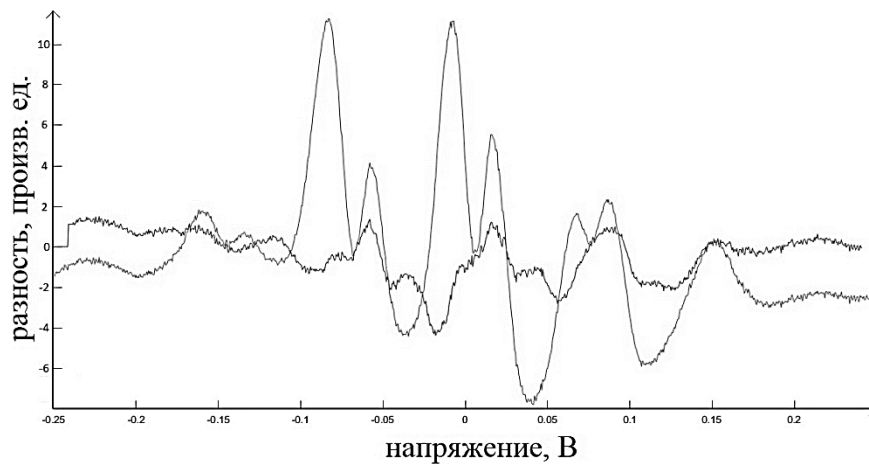


Рис. 5. Поточечная разность экспериментального и обработанного спектров:
темно-серая кривая – обработка предложенным методом, светло-серая кривая –
с помощью функции Эйри

Fig. 5. Pointwise difference between the experimental and processed spectra:
dark grey curve is processing by the proposed method, light grey is using the Airy function

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан принципиально новый метод обработки СВЧ-модулированного спектра излучения диодного лазера, записанного с помощью интерферометра Фабри–Перо. Показано, что использование экспериментально записанной формы пропускания ИФП дает на порядок меньшую погрешность, чем при использовании широко распространенной формулы Эйри. Этот результат можно объяснить тем, что формула Эйри хорошо описывает многопроходную интерференцию пучков, кривизна волнового фронта которых согласована с кривизной зеркал. В реальных экспериментах излучение лазера, как правило, не согласовано с интерферометром, поэтому использование экспериментальной формы пропускания для конкретного интерферометра и излучения дает лучшую точность.

Использование предложенного метода позволяет получить более точную информацию об амплитуде и положении спектральных компонент, что впоследствии может быть использовано в спектроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arimondo E., Orriols G. Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping // *Lettere al Nuovo Cimento*. – 1976. – Vol. 17. – P. 333–338.
2. An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour / G. Alzetta, A. Gozzini, M. Moi, G. Orriols // *Il Nuovo Cimento B*. – 1976. – Vol. 36 (1). – P. 5–20.
3. Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S. Atomic clock based on a coherent population trapping resonance in 87Rb with improved high-frequency modulation parameters // *Proceedings of SPIE*. – 2015. – Vol. 9378. – P. 93780A. – DOI: 10.1117/12.2080165.
4. Optical frequency standard based on the coherent population trapping resonance / E.V. Baklanov, S.N. Bagaev, A.K. Dmitriev, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin // *Laser Physics*. – 2014. – Vol. 24, N 7. – P. 074007.
5. Light shifts in the rubidium CPT atomic clock with laser current modulation at 3.4 and 6.8 GHz / S.M. Ignatovich, I.S. Mesenzova, M.N. Skvortsov, N.L. Kvashnin, V.I. Vishnyakov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2067. – P. 012006.
6. Савинов К.Н., Головин Н.Н., Дмитриев А.К. КПН резонансы при многочастотной оптической накачке // *Квантовая электроника*. – 2022. – Т. 52, № 10. – С. 939–942.
7. Особенности режимов генерации полупроводникового лазера с внешним резонатором при СВЧ модуляции / А.А. Исакова, К.Н. Савинов, Н.Н. Головин, Н.Ж. Алтынбеков, В.И. Вишняков, А.К. Дмитриев // *Квантовая электроника*. – 2017. – Т. 47, № 7. – С. 610–613.
8. Modulation properties of an extended cavity diode laser and dynamic mode splitting / S.A. Zibrov, D.S. Chuchelov, A.E. Drakin, D.A. Shiryayev, E.A. Tsygankov, M.I. Vaskovskaya, V.V. Vassiliev, V.L. Velichansky, A.P. Bogatov // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2020. – Vol. 56, N 3. – P. 2000607. – DOI: 10.1109/JQE.2020.2981120.
9. Measurement of spectral characteristics of semiconductor laser diodes-effect injected current modulation and optical feedback / A. Destrez, Z. Toffano, I. Joindot, C. Birocheau, L. Hassine // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1993. – Vol. 42, N 2. – P. 304–310.
10. Иттербиевый волоконный лазер с распределенной обратной связью с низким уровнем частотных шумов / М.А. Никулин, С.А. Бабин, А.К. Дмитриев, А.С. Дычков, С.И. Каблуков, А.А. Луговой, Ю.Я. Печерский // *Квантовая электроника*. – 2009. – Т. 39, № 10. – С. 906–910.
11. Метод выделения спектральных компонент в сигналах путем интерполяции с помощью систем целочисленных сдвигов / Л.А. Минин, Н.М. Насер, Е.А. Киселев, С.Д. Кургалин // *Цифровая обработка сигналов*. – 2014. – № 4. – С. 9–12.
12. Compact large-aperture Fabry-Pérot interferometer modules for gas spectroscopy at mid-IR / U. Kantojärvi, A. Varpula, T. Antila, C. Holmlund, J. Mäkynen, A. Näsälä, R. Mannila, A. Rissanen, J. Antila, R.J. Disch, T.A. Waldmann // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 8992. – P. 89920C. – DOI: 10.1117/12.2036336.

13. *Olesen H., Jacobsen G.* A theoretical and experimental analysis of modulated laser fields and power spectra // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1982. – Vol. QE-18, N 12. – P. 2069–2080.

14. *Танасюк Д.А., Горностаева С.И., Ермаков В.И.* Обработка оптических спектров поглощения и анализ составляющих полос на форму линии по Гауссу и Лоренцу // *Исследовано в России*. – 2006. – Т. 9, № 212. – С. 2018–2022.

15. *Скорняков Л.Г., Дёмин А.В., Денисова О.В.* Методики обработки результатов измерения спектров интенсивности источников излучения спектрофотометра СФ-56 // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2019. – Т. 85, № 3. – С. 36–40.

Савинов Константин Николаевич, аспирант кафедры лазерных систем, младший научный сотрудник лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, стандарты частоты, КПП-резонансы. Имеет 20 печатных работ. E-mail: k.n.savinov@yandex.ru

Головин Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры лазерных систем, младший научный сотрудник лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, спектроскопия, фемтосекундные лазеры. Имеет 35 печатных работ. E-mail: n.golovin@corp.nstu.ru

Дмитриева Лейла Рамисовна, аспирант кафедры лазерных систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная плазма, стандарты частоты, КПП-резонансы. Имеет 5 печатных работ. E-mail: dmitrieva-leyla@mail.ru

Дмитриев Александр Капитонович, доктор-физико-математических наук, профессор кафедры лазерных систем, главный научный сотрудник лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, спектроскопия, фемтосекундные лазеры. Имеет 150 печатных работ. E-mail: alexander_dmitriev@ngs.ru

Котина Дарья Михайловна, студент физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, стандарты частоты, КПП-резонансы. Имеет одну печатную работу. E-mail: kotinadasha03@yandex.ru

Savinov Konstantin N., post-graduate student at the Department of Laser Systems, junior researcher in the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on laser physics, frequency standard, and CPT resonances. He has more than 20 publications. E-mail: k.n.savinov@yandex.ru

Golovin Nikolai N., senior lecturer of the Department of Laser Systems, junior researcher of the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on laser physics, spectroscopy, and femtosecond lasers. He has more than 35 publications. E-mail: n.golovin@corp.nstu.ru

Dmitrieva Leyla R., a post-graduate student at the Department of Laser Systems, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on laser plasma, frequency standard, CPT resonances. She has more than 5 publications. E-mail: dmitrieva-leyla@mail.ru

Dmitriev Alexander K., D.Sc. (Phys.&Math.), professor at the Department of Laser Systems, chief researcher at the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on laser physics, spectroscopy, and femtosecond lasers. He has more than 150 publications. E-mail: alexander_dmitriev@ngs.ru

Kotina Darya M., a student at Physical Engineering Faculty, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on laser physics, frequency standard, and CPT resonances. She has published 1 paper. E-mail: kotinadasha03@yandex.ru

A method for processing the laser radiation spectrum based on the experimentally recorded transmission form of the Fabry – Perot interferometer *

K.N. SAVINOV^a, N.N. GOLOVIN^b, L.R. DMITRIEVA^c, A.K. DMITRIEV^d,
D.M. KOTINA^e

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 664033, Russian Federation

^a k.n.savinov@yandex.ru ^b n.golovin@corp.nstu.ru ^c dmitrieva-leyla@mail.ru
^d alexander_dmitriev@ngs.ru ^e kotinadasha03@yandex.ru

Abstract

At present, to create quantum frequency standards, the phenomenon of coherent population trapping (CPT) is widely used, in which, when a certain intensity is reached and the frequency interval between the spectral components coincides with the frequency of the hyperfine transition in an atom (most often in rubidium or cesium), a narrow resonance is observed in the absorption spectrum and the transmission of a cell with alkali metal vapor increases sharply. Since the amplitude of the CPT resonance critically depends on the intensity and position of the spectral components of the pump radiation, it is necessary to control the parameters of these components, which are usually recorded in digital form.

This paper describes a fundamentally new method for processing the laser emission spectrum recorded with a scanned Fabry – Perot interferometer (FPI), based on using the experimentally recorded transmission form of the scanned FPI as a reference spectral component. The paper presents examples of processing the experimentally recorded radiation spectra of a diode laser with an external resonator under microwave modulation of its injection current. The error of processing by the proposed method turned out to be approximately an order of magnitude smaller than when processing by the well-known Airy formula describing the transmission of the FPI. This is explained by the fact that the Airy formula is valid for light beams whose wave front curvature is consistent with the curvature of the IFP mirrors, which is often not true in the case of a real experiment.

The method can be used to process the spectra of modulated radiation of various types of lasers, which is an important task in detecting CPT resonances and further creating quantum frequency standards based on them.

Keywords: diode laser, emission spectrum, spectrum processing, frequency modulation, Airy formula, CPT resonance, frequency standard, Fabry-Perot interferometer

REFERENCES

1. Arimondo E., Orriols G. Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping. *Lettere al Nuovo Cimento*, 1976, vol. 17, pp. 333–338.
2. Alzetta G., Gozzini A., Moi M., Orriols G. An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour. *Il Nuovo Cimento B*, 1976, vol. 36, pp. 5–20.

* Received 02 March 2023.

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FSUN-2023-0007).

3. Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S. Atomic clock based on a coherent population trapping resonance in ^{87}Rb with improved high-frequency modulation parameters. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9378, p. 93780A. DOI: 10.1117/12.2080165.
4. Baklanov E.V., Bagaev S.N., Dmitriev A.K., Taichenachev A.V., Yudin V.I. Optical frequency standard based on the coherent population trapping resonance. *Laser Physics*, 2014, vol. 24, no. 7, p. 074007.
5. Ignatovich S.M., Mesenzova I.S., Skvortsov M.N., Kvashnin N.L., Vishnyakov V.I. Light shifts in the rubidium CPT atomic clock with laser current modulation at 3.4 and 6.8 GHz. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2067, p. 012006.
6. Savinov K.N., Golovin N.N., Dmitriev A.K. KPN rezonansy pri mnogochastotnoi opticheskoi nakachke [CPT resonances under multifrequency optical pumping]. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 2022, vol. 52, no. 10, pp. 939–942. (In Russian).
7. Isakova A.A., Savinov K.N., Golovin N.N., Altynbekov N.Zh., Vishnyakov V.I., Dmitriev A.K. Osobennosti rezhimov generatsii poluprovodnikovogo lazera s vneshnim rezonatorom pri SVCh modulyatsii [Specific features of oscillation regimes of an external cavity diode laser under microwave modulation]. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 7, pp. 610–613. (In Russian).
8. Zibrov S.A., Chuchelov D.S., Drakin A.E., Shiryayev D.A., Tsygankov E.A., Vaskovskaya M.I., Vassiliev V.V., Velichansky V.L., Bogatov A.P. Modulation properties of an extended cavity diode laser and dynamic mode splitting. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, vol. 56, no. 3, p. 2000607. DOI: 10.1109/JQE.2020.2981120.
9. Destrez A., Toffano Z., Joindot I., Birocheau C., Hassine L. Measurement of spectral characteristics of semiconductor laser diodes-effect injected current modulation and optical feedback. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1993, vol. 42, no. 2, pp. 304–310.
10. Nikulin M.A., Babin S.A., Kablukov S.I., Dmitriev A.K., Dychkov A.S., Lugovoy A.A., Pecherskii Yu.Ya. Itterbievyi volokonnyi lazer s raspredelennoi obratnoi svyaz'yu s nizkim urovnem chastotnykh shumov [Low frequency noise distributed-feedback ytterbium fibre laser]. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 2009, vol. 39, no. 10, pp. 906–910. (In Russian).
11. Minin L.A., Nasir N.M., Kiselev E.A., Kurgalin S.D. Metod vydeleniya spektral'nykh komponent v signalakh putem interpolyatsii s pomoshch'yu sistem tselochislennykh sdvigo [Method of extraction of spectral components in signals by interpolation via systems of integer shifts]. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*, 2014, no. 4, pp. 9–12.
12. Kantojärvi U., Varpula A., Antila T., Holmlund C., Mäkynen J., Näsälä A., Mannila R., Rissanen A., Antila J., Disch R.J., Waldmann T.A. Compact large-aperture Fabry-Pérot interferometer modules for gas spectroscopy at mid-IR. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 8992, p. 89920C. DOI: 10.1117/12.2036336.
13. Olesen H., Jacobsen G. A theoretical and experimental analysis of modulated laser fields and power spectra. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. QE-18, no. 12, pp. 2069–2080.
14. Tanasyuk D.A., Gornostaeva C.I., Ermakov V.I. Obrabotka opticheskikh spektrov pogloshcheniya i analiz sostavlyayushchikh polos na formu linii po Gaussu i Lorentsu [Processing of optical absorption spectra and analysis of constituent bands for the shape of a line by Gauss and Lorentz]. *Issledovano v Rossii = Investigated in Russia*, 2006, vol. 9, no. 212, pp. 2018–2022.
15. Skorniyakov L.G., Demin A.V., Denisova O.V. Metodiki obrabotki rezul'tatov izmereniya spektrov intensivnosti istochnikov izlucheniya spektrofotometra SF-56 [Approximation methods used for processing measurements of the intensity spectra of radiation sources of SF-56 spectrophotometers]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2019, vol. 85, no. 3, pp. 36–40.

Для цитирования:

Способ обработки спектра излучения лазера на основе экспериментально записанной формы пропускания интерферометра Фабри-Перо / К.Н. Савинов, Н.Н. Головин, Л.Р. Дмитриева, А.К. Дмитриев, Д.М. Котина // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 141–151. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-141-151.

For citation:

Savinov K.N., Golovin N.N., Dmitrieva L.R., Dmitriev A.K., Kotina D.M. Sposob obrabotki spektra izlucheniya lazera na osnove eksperimental'no zapisannoi formy propuskaniya interferometra Fabri-Pero [A method for processing the laser radiation spectrum based on the experimentally recorded transmission form of the Fabry-Perot interferometer]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 141–151. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-141-151.