

УДК 528.526.6
EDN: JBSIFV

PACS: 42.81.Pa

Интерферометрический волоконно-оптический гироскоп с модулятором двулучепреломления в составе гибридной интегральной схемы

И. Л. Кубланова, А. В. Куликов

Представлена новая схема интерферометрического волоконно-оптического гироскопа (ИВОГ). Целью разработки настоящего прибора служило нивелирование воздействия поверхностных пьезо- и пьезоэлектрических эффектов в кристалле ниобата лития на результирующее значение угловой скорости вращения гироскопа, что становится возможным путем замены двух разнесённых на поверхности кристалла фазовых модуляторов одним модулятором двулучепреломления. Сопутствующие изменения в оптической схеме могут привести к незнакомым эффектам по сравнению с ИВОГ, предложенным Эрве К. Лефевром. В настоящей работе мы рассматриваем возможную причину появления такого эффекта и предлагаем способы избежать его проявления. Исследование температурных зависимостей проводится с использованием разных источников оптического излучения, с изменением конфигурации экспериментальной установки и при различных скоростях изменения температуры. Полученный результат свидетельствует о верности гипотезы и необходимости дальнейшего преобразования оптической схемы.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, модулятор двулучепреломления, эрбиевый суперлюминесцентный источник оптического излучения, суперлюминесцентный диод, термические испытания.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-114-119

Введение

Интерферометрический волоконно-оптический гироскоп (ИВОГ) используется для измерения скорости вращения и применяется в навигации и гиросtabilизации [1, 2]. Принцип действия ИВОГ основан на эффекте Саньяка-Лауэ, согласно которому две опти-

ческие волны, распространяющиеся навстречу по оптическому контуру, приобретают фазовый сдвиг, пропорциональный скорости вращения этого контура [3–6]. Таким образом, чувствительным элементом ИВОГ является волоконно-оптическая катушка. Благодаря отсутствию движущихся частей ИВОГ надёжен и имеет длительный срок службы. Будучи интерферометрическим датчиком, он обладает высокой чувствительностью, что является одновременно его преимуществом и сложностью. С одной стороны, теоретически точность измерений не ограничена. С другой стороны, высоко влияние факторов окружающей среды на результаты измерений.

Чувствительный элемент является основной частью ИВОГ, однако для точного получения информации о фазовом сдвиге необходимо проводить измерения в квадратурной

Кубланова Ида Леонидовна, инженер.

E-mail: ilkublanova@itmo.ru

Куликов Андрей Владимирович, доцент, к.т.н.

Университет ИТМО.

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-кт, 49А.

Статья поступила в редакцию 10.07.2024

После доработки 29.07.2024

Принята к публикации 13.08.2024

Шифр научной специальности: 2.2.4

© Кубланова И. Л., Куликов А. В., 2024

точке оптического сигнала. Оптический модулятор осуществляет сдвиг в квадратурную точку, а также обеспечивает обратную связь. В оптической схеме, предложенной Эрве К. Лефевром, модуляция осуществляется с помощью многофункциональной интегральной оптической схемы (МИОС), содержащей два фазовых электрооптических модулятора. Между волнами, проходящими через эти модуляторы, индуцируется необходимая разность фаз. Затем волны встречно распространяются по волоконно-оптическому контуру и попадают обратно в МИОС, где снова модулируются.

Подобные электрооптические модуляторы зачастую изготавливаются на основе кристалла ниобата лития благодаря стабильности его оптических свойств и высокому электрооптическому коэффициенту [7–9]. Однако кристалл ниобата лития также обладает рядом других кристаллофизических эффектов: пьезоэлектрических, пьезоэлектрических, фоторефрактивных и других эффектов [10–14]. Эти эффекты приводят к нежелательным явлениям, ограничивающим эффективность электрооптических модуляторов.

В частности, пьезоэлектрический и пьезоэлектрический поверхностные эффекты, не-

равномерно распределенные по поверхности кристалла, вызывают различающиеся фазовые сдвиги в двух плечах электрооптического модулятора. Из-за этого к результирующему фазовому сдвигу ИВОГ добавляется неизвестное и некомпенсируемое значение, что приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик.

Преимущества использования модулятора двулучепреломления

Для уменьшения влияния паразитных эффектов в МИОС вместо двух фазовых модуляторов предлагается использовать один модулятор двулучепреломления. Плечи такого модулятора физически расположены в одном волноводе, где распространяются волны двух ортогональных линейных поляризаций. В результате поверхностные пьезоэлектрический и пьезоэлектрический эффекты действуют на модулированные волны в известном соотношении, а значит, их влияние компенсируемо.

На основе этой гипотезы была спроектирована оптическая схема (рис. 1) и собрана модель интерферометрического волоконно-оптического гироскопа с модулятором двулучепреломления (ИВОГ-МДЛП).

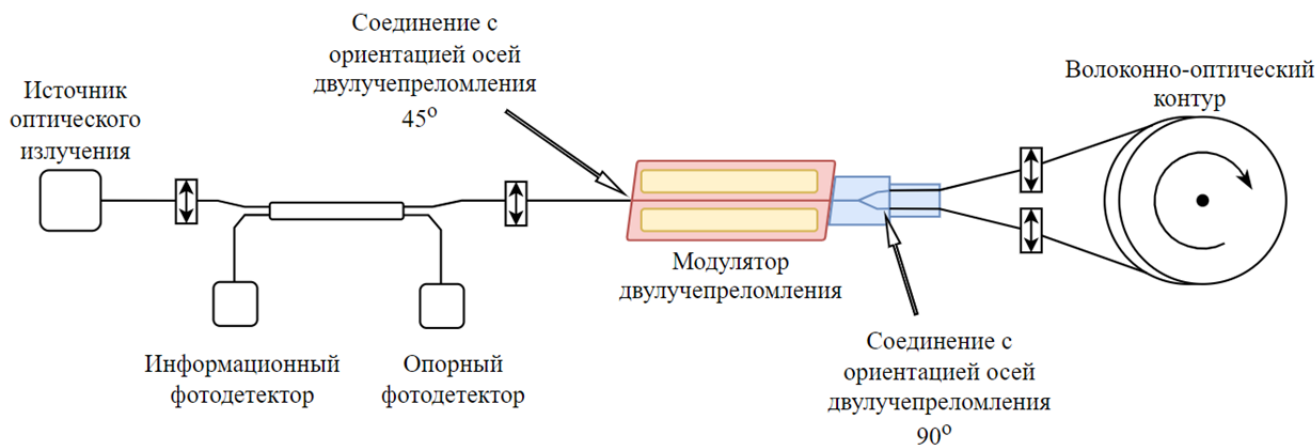


Рис. 1. Оптическая схема ИВОГ-МДЛП

Особенности создания ИВОГ-МДЛП

Замена двух фазовых модуляторов на один модулятор двулучепреломления повлияла на всю оптическую схему.

Для ввода оптического излучения в две оси двулучепреломления волновода модуля-

тора было осуществлено соединение оптического волокна и волновода с ориентацией осей двулучепреломления 45°. Далее необходимо разнести модулированные волны в два плеча интерферометра Саньяка. Чтобы избежать влияния внешних факторов на коэффициент деления, был выбран планарный светодели-

тель (PLC). Чтобы две модулированные волны распространялись вдоль одной оси двулучепреломления, один конец волокна контура был соединён с PLC с ориентацией осей двулучепреломления 90° , а другой – соосно. Далее в обоих плечах интерферометра находятся согласованные линейные поляризаторы. Таким образом, по волоконно-оптическому контуру распространяются модулированные волны одной поляризации.

Модель собрана и протестирована. Работоспособность доказана [16]. Однако изменение абсолютной температуры ведёт к появлению нелинейных участков в результирующем сигнале, что негативно отражается на применимости устройства.

В настоящей работе мы исследуем природу появляющейся нелинейности и анализируем вероятные причины ее возникновения.

Температурные испытания с эрбиевым источником оптического излучения

Было проведено несколько различных температурных испытаний, чтобы выявить источник нелинейности и попытаться устранить его. Первоначально при испытаниях применялся эрбиевый суперлюминесцентный источник оптического излучения, широко используемым в гироскопии [17–22].

Были проведены тепловые испытания, в ходе которых гироскоп и источник оптического излучения были помещены в камеру теплехолода и подверглись изменению температуры в пределах от 15°C до 35°C . Серия испытаний включала эксперименты с разной скоростью изменения температуры: $3,3^\circ\text{C}/\text{ч}$, $2,5^\circ\text{C}/\text{ч}$, $2^\circ\text{C}/\text{ч}$ и $1,6^\circ\text{C}/\text{ч}$ (рис. 2).

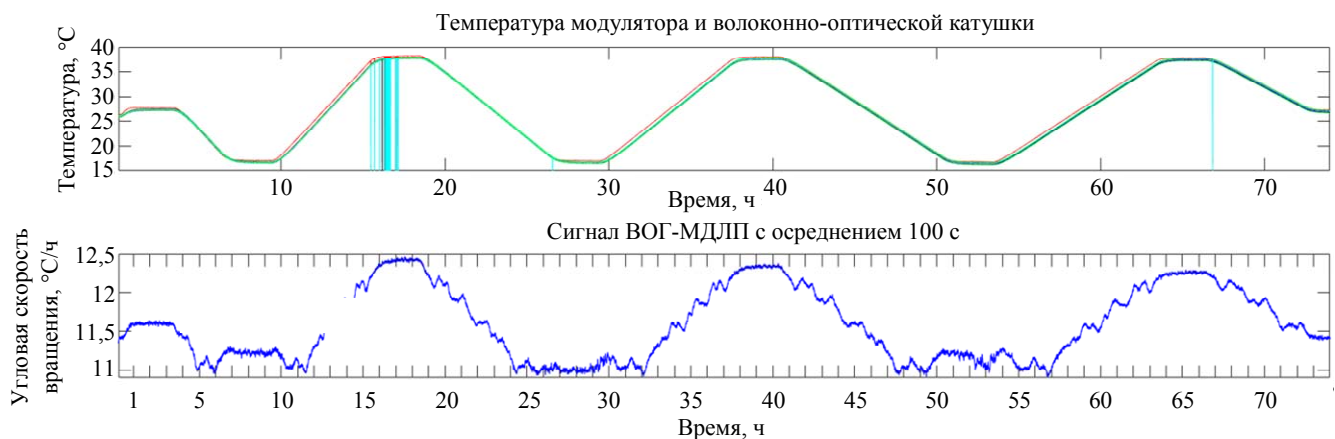


Рис. 2. Результаты термических испытаний со скоростью изменения температуры $3,3^\circ\text{C}/\text{ч}$, $2,5^\circ\text{C}/\text{ч}$, $2^\circ\text{C}/\text{ч}$, $1,6^\circ\text{C}/\text{ч}$

Как видно из графика (рис. 2), изменение абсолютной температуры ведёт к появлению нелинейных участков в сигнале угловой скорости вращения. Максимумы и минимумы в этих областях соответствуют одним и тем же значениям температуры даже при разной скорости её изменения, следовательно, сигнал гироскопа зависит от изменения абсолютной температуры. Поскольку показания гироскопа в идеальных условиях не зависят от температуры, вероятно, к ним добавляется сигнал паразитного интерферометра.

Возможно также, что нелинейные участки сигнала вызваны воздействием изменений температуры на эрбиевый источник оптического излучения. Для доказательства этой гипотезы были проведены тепловые испытания

с одинаковым температурным профилем, при которых эрбиевый источник оптического излучения находился внутри и снаружи камеры теплехолода. Было выявлено, что при нахождении оптического источника вне камеры нелинейности сигнала сохранялись, хотя общая амплитуда несколько уменьшалась. Это говорит о том, что ИВОГ-МДЛП содержит паразитный интерферометр.

Температурные испытания с оптическим источником более широкого спектра излучения

Одним из способов борьбы с паразитным интерферометром является уменьшение

длины декогерентности излучения. Обычно это достигается за счет расширения спектра оптического источника. Как указано выше, первоначально испытания проводились с использованием эрбиевого суперлюминесцентного источника ИРЭ-Полус ЭСС-30-С. Его спектральная ширина составляет 25 нм. Тепловые испытания было решено провести с использованием суперлюминесцентного диода (СЛД) EXS210069-01 с минимальной спек-

тральная ширина которого составляет 35 нм, а типичная – 45 нм.

Термические испытания с использованием источника СЛД вне камеры тепла-холода со скоростью изменения температуры 3,3 °С/ч показали отсутствие нелинейных участков в результирующем сигнале угловой скорости вращения ИВОГ-МДЛП (рис. 3а). Это подтверждает версию о появлении в макете паразитного интерферометра.

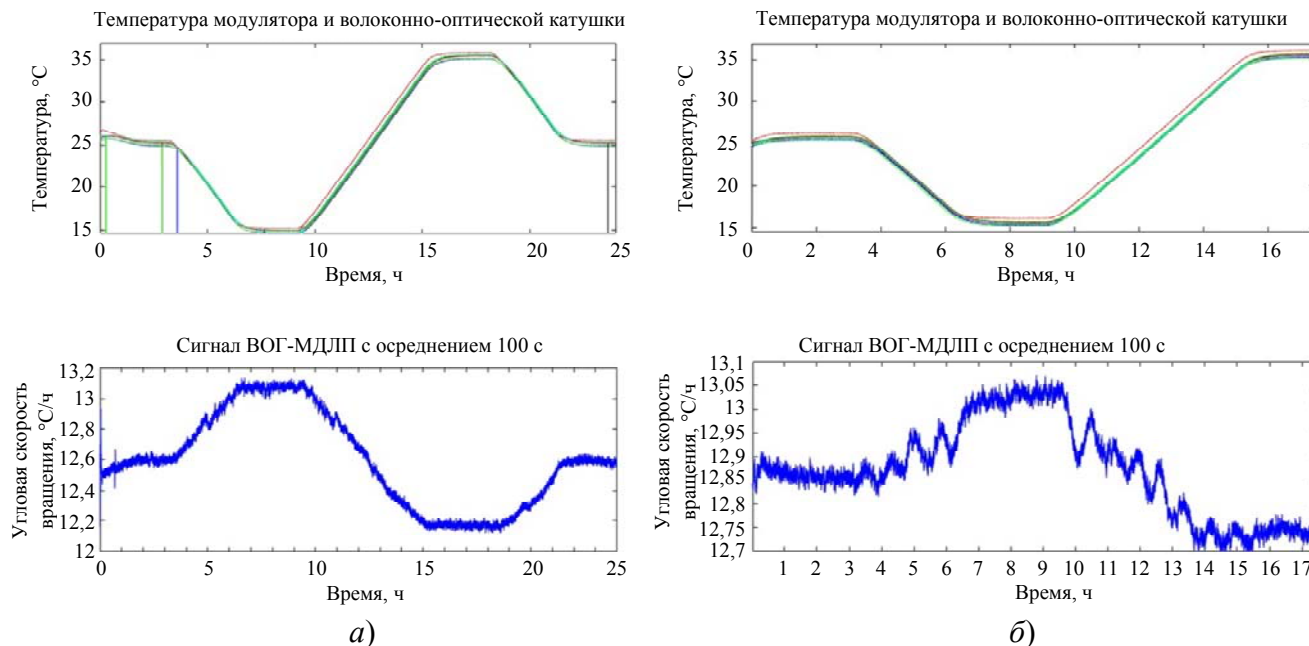


Рис. 3. Результаты термических испытаний со скоростью изменения температуры 3,3 °С/ч с оптическим SLD источником (а) снаружи и (б) внутри камеры тепла-холода

Однако, когда источник СЛД был помещен внутрь камеры тепла-холода, изменение абсолютной температуры снова вызвало появление нелинейных участков (рис. 3б).

Спектры источников излучения ограничены полосой усиления активных сред, поэтому более целесообразным решением может быть изменение оптической схемы ИВОГ-МДЛП для минимизации паразитной интерференции.

Планируемые преобразования

Одним из способов избавления от паразитного интерферометра является минимизация количества сварочных соединений в волоконно-оптическом контуре.

Теоретически, если оставить в оптическом контуре один линейного поляризатора и одно сварочного соединения, ИВОГ-МДЛП

должен сохранить работоспособность, поскольку через этот линейный поляризатор проходит излучение, распространяющееся по часовой стрелке, и излучение, распространяющееся против часовой стрелки.

Экспериментальные данные показывают, что одно соединение в контуре не способствует появлению паразитного интерферометра.

Заключение

В настоящей статье представлена схема ИВОГ с использованием модулятора двулучепреломления. Продемонстрировано появление нелинейных участков сигнала угловой скорости вращения при изменении абсолютной температуры. Выявлено, что эта нелинейность вызвана наличием в устройстве паразитного интерферометра. Для минимизации его воздействия была предпринята попытка исполь-

зовать оптический источник СЛД со спектром 45 нм, что шире спектра используемого эрбиевого источника 25 нм. Нелинейные участки исчезли только при использовании СЛД источника вне камеры тепла-холода. При тестировании с СЛД источником внутри камеры тепла-холода нелинейные участки всё равно проявлялись. В связи с этим планируется модификация схемы ИВОГ-МДЛП для избавления от паразитного интерферометра.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Авторы выражают благодарность АО «Государственный научный центр Российской Федерации «Концерн ЦНИИ Электроприбор», а именно заместителю руководителя 084 отд. А. А. Унтилтову за возможность проведения испытаний и инженеру С. Т. Нефоросному за помощь в проведении испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Burns W. K., Moeller R. P., Villarruel C. A., Abebe M. / Optics letters. 1983. Vol. 8. № 10. P. 540–542.
2. Pavlath G. A. / In Optical Fiber Sensors. Optica Publishing Group. 2006. Vol. 10. P. MA3.
3. Sagnac G. / CR Acad. Sci. 1913. № 157. P. 708–710.
4. Laue M. / Münchener Sitzungsberichte. 1911. № 12. P. 405–412.
5. Vali V., Shorthill R. W. / Applied optics. 1976. Vol. 15. № 5. P. 1099–1100.
6. Lefevre H. C. The fiber-optic gyroscope. – Artech house, 2022.
7. Noguchi K. Lithium niobate modulators. Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications. – Boca Raton: CRC Press, 2012.
8. Su S. D., Wan L. Y., Zhou Y., Sun J. F., Liu L. R. / Acta Optica Sinica. 2010. Vol. 30. № 10. P. 2972–2977.
9. Du W. Y., Zhang Z. B., Xu J. Q., Wong W. H., Yu D. Y., Pun E. Y. B., Zhang D. L. / Optical Materials Express. 2016. Vol. 6. № 8. P. 2593–2599.
10. Pogorelaya D. A., Smolovik M. A., Strigalev V. E., Aleynik A. S., Deyneka I. G. / Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. № 1. P. 012040.
11. Wong K. K. Properties of lithium niobate. – London: INSPEC, 2002.
12. Nagata H. / IEEE Photonics Technology Letters. 2000. Vol. 12. № 11. P. 1477–1479.
13. Nagata H., Honda H., Akizuki K. / Optical Engineering. 2000. Vol. 39. № 4. P. 1103–1105.
14. Sathian J., Jaatinen E. / Optics express. 2013. Vol. 21. № 10. P. 12309–12317.
15. Kip D. / Applied Physics B: Lasers Optics. 1998. Vol. 67. № 2. P. 131–151.
16. Kublanova I. L., Shulepov V. A., Kulikov A. V. / Gyroscopy and Navigation. 2021. Vol. 12. № 4. P. 363–369.
17. Liu S., Hu J., Wang Y., Liu Q., Ma H., He Z. / Optics Letters. 2023. Vol. 48. № 10. P. 2639–2642.
18. Hui F., Tianjin M. L., Ma L., Zuo W., Zhang S., Zhang X. M. / 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). Saint Petersburg, Russia, 29–31 May 2017. P. 1–4.
19. Zuo W., Yan M., Song C., Hu X. / AOPC 2022: Optical Sensing, Imaging, and Display Technology. – Beijing, 2022. P. 535–540.
20. Guillaumond D., Meunier J. P. / IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2001. Vol. 7. № 1. P. 17–21.
21. Yu X., Song N., Zhang C., Zhang Z., Song J., Yang H. / IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2023. Vol. 72.
22. Азанова И. С., Шаронова Ю. О., Шевцова А. Д., Поспелова Е. А., Вахрушев А. С., Вохмянина О. Л., Вольницев А. Б. / Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2023. № 1. P. 5–20.

PACS: 42.81.Pa

Interferometric fiber-optic gyroscope with birefringence modulator in hybrid integrated circuit

I. L. Kublanova and A. V. Kulikov

ITMO University
49 Kronverkskiy pr., Saint-Petersburg, 197101, Russia

Received 10.07.2024; revised 29.07.2024; accepted 13.08.2024

This paper presents a new scheme of interferometric fiber-optic gyroscope (IFOG). It becomes possible to escape the parasitic influence of surface pyro- and piezoelectric effects in a lithium

niobate crystal on the signal providing modulation by replacing two phase modulators spaced on the surface of the crystal with an electro-optic birefringence modulator. Accompanying changes in the optical scheme can lead to unfamiliar effects compared to the IFOG proposed by Herve C. Lefevre. In this work, we consider a possible reason for the appearance of such an effect and suggest ways to escape its manifestations. The study of temperature dependences is carried out using different sources of optical radiation, changing the configuration of the experimental setup and at different rates of temperature change. The obtained result indicates the correctness of the hypothesis and the need for further transformation of the optical design.

Keywords: fiber-optic gyroscope, birefringence modulator, erbium superluminescent source, superluminescent diode, thermal tests.

REFERENCES

1. Burns W. K., Moeller R. P., Villarruel C. A. and Abebe M., Optics letters. **8** (10), 540–542 (1983).
2. Pavlath G. A., In Optical Fiber Sensors. Optica Publishing Group. № 10, MA3 (2006).
3. Sagnac G., CR Acad. Sci., № 157, 708–710 (1913).
4. Laue M., Münchener Sitzungsberichte, № 12, 405–412 (1911).
5. Vali V. and Shorthill R. W., Applied optics, **15** (5), 1099–1100 (1976).
6. Lefevre H. C., The fiber-optic gyroscope, Artech house, 2022.
7. Noguchi K., Lithium niobate modulators. Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications., Boca Raton, CRC Press, 2012.
8. Su S. D., Wan L. Y., Zhou Y., Sun J. F. and Liu L. R., Acta Optica Sinica **30** (10), 2972–2977 (2010).
9. Du W. Y., Zhang Z. B., Xu J. Q., Wong W. H., Yu D. Y., Pun E. Y. B. and Zhang D. L., Optical Materials Express **6** (8), 2593–2599 (2016).
10. Pogorelaya D. A., Smolovik M. A., Strigalev V. E., Aleynik A. S. and Deyneka I. G., Journal of Physics: Conference Series **735** (1), 012040 (2016).
11. Wong K. K., Properties of lithium niobate, London: INSPEC, 2002.
12. Nagata H., IEEE Photonics Technology Letters **12** (11), 1477–1479 (2000).
13. Nagata H., Honda H. and Akizuki K., Optical Engineering **39** (4), 1103–1105 (2000).
14. Sathian J. and Jaatinen E., Optics express **21** (10), 12309–12317 (2013).
15. Kip D., Applied Physics B: Lasers Optics **67** (2), 131–151 (1998).
16. Kublanova I. L., Shulepov V. A. and Kulikov A. V., Gyroscopy and Navigation **12** (4), 363–369 (2021).
17. Liu S., Hu J., Wang Y., Liu Q., Ma H. and He Z., Optics Letters **48** (10), 2639–2642 (2023).
18. Hui F., Tianjin M. L., Ma L., Zuo W., Zhang S. and Zhang X. M., 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). Saint Petersburg, 29–31 May 2017, pp. 1–4.
19. Zuo W., Yan M., Song C. and Hu X., AOPC 2022: Optical Sensing, Imaging, and Display Technology. Beijing, 2022, pp. 535–540.
20. Guillaumond D. and Meunier J. P., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **7** (1), 17–21 (2001).
21. Yu X., Song N., Zhang C., Zhang Z., Song J. and Yang H., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, № 72 (2023).
22. Azanova I. S., Sharonova Yu. O., Shevtsova A. D., Pospelova E. A., Vakhrushev A. C., Vokhmyanina O. L. and Volyntsev A. B., Bulletin of Perm University. Physics, № 1, 5–20 (2023) [in Russian].