




Н.Е. Аханова¹ , Е. Ерланулы¹ ,
С.А. Дарзнек², Д.Г. Батрышев^{1,3*} 

¹Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

²Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Россия, г. Москва

³Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Казахстан, г. Атырау,

*e-mail: batryshev@physics.kz

ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

На сегодняшний день акустические методы неразрушающего контроля занимают особое место в процессе диагностики технического состояния промышленных устройств и объектов для обеспечения их безопасной и надежной эксплуатации. И для этих целей в качестве специализированного инструмента используются так называемые акустоэлектрические преобразователи, работа которых основана на преобразовании механического смещения в электрический сигнал. Подобные преобразователи по-другому называют пьезоэлектриками, на которых налагаются особые требования к чувствительности и надежности. Для обеспечения подобных технических характеристик применяют процедуры по калибровке и проверке на основе оптических методов исследований. Данная работа посвящена подобному роду исследования, а именно изучению колебания пьезоэлектрика с помощью лазерной измерительной системы, работающей по принципу интерферометра А. Майкельсона. В ходе эксперимента было установлено, что изменение показателей механического колебания керамического пьезоэлектрика приводит к изменению формы регистрируемого сигнала фотодетектора (интерференционной картины). Известно, что в процессе оптических измерений имеет место ряд неконтролируемых шумов, и для снижения их воздействий, в том числе шумов от самого фотодетектора необходимо понижение частоты и амплитуды колебания пьезоэлектрика. Показано, что использование расчетной фильтрации позволяет выделить полезный сигнал и удобно определить зависимость смещения пьезоэлектрика от времени.

Ключевые слова: пьезоэлектрик, колебание, интерферометр, смещение, осциллограмма, лазер, вибросигнал.

N.E. Akhanova¹, Ye. Yerlanuly¹, S.A. Darznek², D.G. Batryshev^{1,3*}

¹Kazakh-British technical university, Kazakhstan, Almaty

²Research center for the study of surface and vacuum properties, Russia, Moscow

³Kh.Dosmukhamedov Atyrau university, Kazakhstan, Atyrau,

*e-mail: batryshev@physics.kz

Study of piezoelectric oscillations by using a laser measuring system

Today, acoustic non-destructive testing methods play an important role in the process of diagnosing the technical condition of industrial devices and facilities to ensure their safe and reliable operation. For these purposes, the so-called acoustoelectric transducers are used as a specialized tool, which is based on the conversion of mechanical displacement into an electrical signal. On the other hand, such converters are called piezoelectrics, which have to have special properties as sensitivity and reliability. Calibration and verification procedures based on optical research methods are used to ensure such technical characteristics. This work is devoted to a similar kind of research, namely, the study of oscillations of a piezoelectric using a laser measuring system operating on the principle of the A. Michelson interferometer. In the experimental works, it was found that a change in the parameters of the mechanical vibration of a ceramic piezoelectric leads to a change in the shape of the recorded signal of the photodetector (interference pattern). It is known that in the process of optical measurements there are several uncontrolled noises, and to reduce their effects, including noise from the photodetector itself, there is a need to reduce the frequency and amplitude of oscillation of the piezoelectric. It is shown that the use of calculated filtering makes it possible to isolate the useful signal and conveniently determine the dependence of the piezoelectric displacement on time.

Key words: piezoelectric, oscillation, interferometer, displacement, oscillogram, laser, vibration signal.

Н.Е. Аханова¹, Е. Ерланұлы¹, С.А. Дарзбек², Д.Ф. Батрышев^{1,3*}¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.²Вакуум және беттік қасиеттерін зерттеу жөніндегі ғылыми-зерттеу орталығы, Ресей, Мәскеу қ.³Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Қазақстан, Атырау қ.

*e-mail: batryshev@physics.kz

Лазерлік өлшеу жүйесі арқылы пьезоэлектрлік тербелісті зерттеу

Қазіргі таңда бұзылмайтын бақылаудың акустикалық әдістері өнеркәсіптік құрылғылар мен объектілердің техникалық жағдайын диагностикалау процесінде олардың қауіпсіз және сенімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін ерекше орын алады. Осы мақсатта арнайы құрал ретінде акустоэлектрлік түрлендіргіштер қолданылады, олардың жұмысы механикалық ығысуды электр сигналына айналдыруға негізделген. Мұндай түрлендіргіштер сезімталдығы мен сенімділігіне ерекше талаптар қойылатын, пьезоэлектриктер деп аталады. Осындай техникалық сипаттамаларды қамтамасыз ету үшін оптикалық зерттеу әдістері негізінде калибрлеу және тексеру процедуралары қолданылады. Бұл жұмыс осындай зерттеуге арналған, атап айтқанда А. Майкельсонның интерферометр принципі бойынша жұмыс істейтін лазерлік өлшеу жүйесін қолдана отырып, пьезоэлектрлік тербелісті зерттеуге арналған. Тәжірибе барысында керамикалық пьезоэлектриктің механикалық тербеліс көрсеткіштерінің өзгеруі фотодетектордың (интерференциялық сурет) тіркелген сигналының пішінінің өзгеруіне әкелетіні анықталды. Оптикалық өлшеу процесінде бірқатар бақыланбайтын шуылдар бар екендігі белгілі және олардың әсерін азайту үшін, соның ішінде фотодетектордан шыққан шуылды азайту үшін пьезоэлектрик тербелісінің жиілігі мен амплитудасын төмендету қажет. Есептік сүзгілеуді қолдану пайдалы сигналды бөліп көрсетуге және пьезоэлектриктің уақытқа тәуелділігін қажетті дәрежеде анықтауға мүмкіндік беретіні көрсетілген.

Түйін сөздер: пьезоэлектрик, тербеліс, интерферометр, ығысу, осциллограмма, лазер, діріл сигналы.

Введение

Растущий интерес к прикладным нанотехнологическим процессам в последние годы повысил спрос на системы, способные качественно измерять в нанометрическом и субнанометрическом масштабах с высоким разрешением. Одним из широко развивающихся направлений является методы и средства оптических измерений (лазерной интерферометрии-фазометрии), опирающихся на фундаментальные константы и эталоны физических величин. В случае нанометрических измерений классические методы интерферометрии с использованием метода фазового сдвига оказались надежным методом с точностью порядка 1 \AA [1]. Однако эти методы хорошо работают только при соблюдении строгих лабораторных условий измерений, при этом используемые системы являются дорогими, требующего большого количества оптического компонента, тщательной юстировки и калибровки.

Более экономичное и компактное решение для измерения смещения может быть получено с использованием оптической интерферометрии с обратной связью (optical feedback interferometry – OFI), также известной как самосмешивающиеся интерферометрия (self-mixing interferometry SMI). В OFI свет, рассеянный обратно от движущейся мишени, вновь попадает в резона-

тор лазера, вызывая модуляцию оптической выходной мощности (ОВМ) лазера [2]. Интенсивности лучей напрямую связаны с изменениями длины оптического пути от лазера до мишени. Одна из первых математических моделей для OFI описана в классической работе Ланга и Кобаяси [3], где модуляция объясняется в терминах электрического поля. В более поздних моделях, представленной в [4], в котором используется двухрезонаторный Фабри – Перо резонатор, описываются эффекты коэффициента связи (С) и коэффициента усиления ширины линии (α) в ОВМ лазерного диода.

В последние годы были предложены различные конструктивные методы для достижения высокой точности в нано-масштабе [5-19]. В 2007 году Ченг предложил оригинальный метод улучшения разрешения измерений до $\lambda/34$ [8]. Однако требуемую отражающую и пропускающую способности мишени трудно достичь при практическом исполнении. В 2013 году Вонг и другие использовали внешнее зеркало, чтобы достигнуть предельной точности $\lambda/6$ [9]. Теоретически, точность полосы может быть легко улучшена путем увеличения времени отражения. Однако время отражения ограничено расстоянием между внешним зеркалом и измеряемым объектом. Основываясь на методе множественных отражениях, Гуо и др. предложили интерферо-

метр решёточного самосмещения с автоколлимационной конструкцией [10]. Этот метод имеет существенные преимущества, заключающиеся в исключении обратной связи дифракционного пучка нулевого порядка и получении точности в несколько нанометров. На практике, поверхность измеряемой цели должна быть прикреплена с помощью решетки, а углу падения луча лазера должен соответствовать особым требованиям. В 2013 году Тан и другие также предложили метод, который сочетает в себе лазер со смещенной по частоте обратной связью и осевую позиционную способность конфокальной микроскопии, чтобы улучшить его осевое разрешение до 2 нм, в условиях неоднозначности диапазона около десяти микрон [11]. В 2015 году Зенг и другие в своей работе использовали улучшенный метод многократного отражения, основанный на единичных эффектах обратной связи с ортогональной поляризацией высокого порядка, который улучшил точность полосы до $\lambda/58$ [12].

Одной из новейших разработок в области лазерной интерферометрии в нанодиапазоне является работа Вей и др. [15], в котором предложен быстрый алгоритм с равномерной мощностью, что позволяет достигать нанометровой точности без добавления каких-либо оптических компонентов. Быстрый алгоритм четной мощности может теоретически улучшить точность полосы до $\lambda/(2^{n+3})$, когда сигнал SMI имеет хотя бы одну полную полосу. Однако сигнал будет с шумом,

если амплитуда намного меньше значения $\lambda/2$. Следовательно, быстрый алгоритм четной мощности будет не практичным, поскольку сигнал не может быть хорошо нормализован. На основе вышеизложенного в работе [16] авторы развивают интегрированную методику измерения, комбинируя быстрый алгоритм с четной мощностью с методикой множественного отражения для улучшения измерения вибрации в наноразмерной величине.

Учитывая вышеизложенное на сегодняшний день, разработка лазерной измерительной системы для измерения линейных перемещений в нанодиапазоне являются весьма актуальной для практического применения. В настоящей статье рассматривается метод измерения колебания и смещения пьезоэлектрика с помощью лазерной измерительной системы, основанной на интерферометрии А. Майкельсона.

Эксперимент и обсуждение

Лазерная измерительная система представляет собой структуру из источника лазерного излучения, оптических элементов (разделителя луча, зеркал, расширителя луча), фотодетектора и керамического пьезоэлектрика. Структурно-функциональная схема лазерной измерительной системы аналогична ранее представленной структуре в работе [20] и показана на рисунке 1.

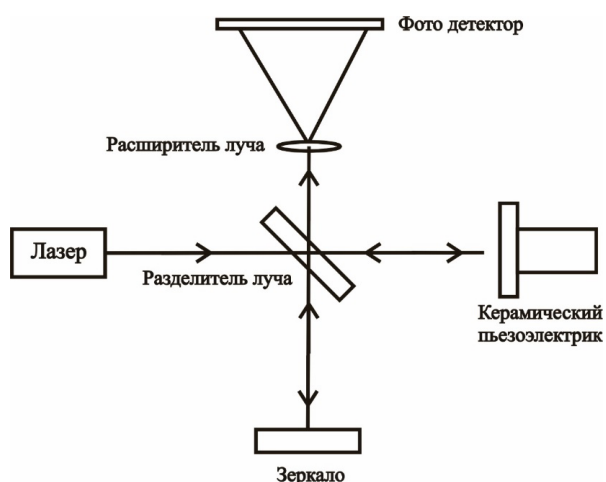


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема лазерной измерительной системы

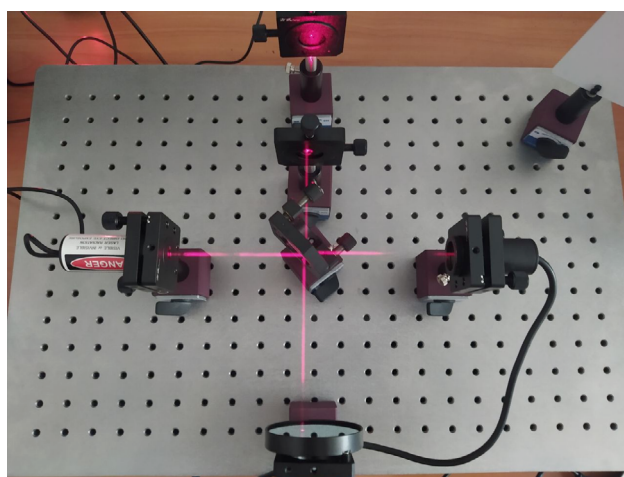


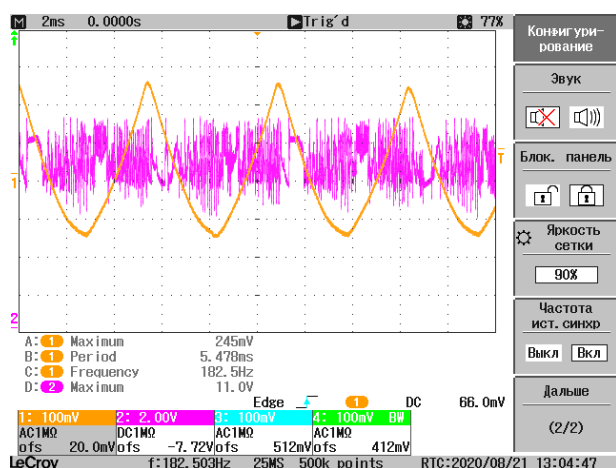
Рисунок 2 – Лазерная измерительная система в рабочей платформе

В качестве источника света используется полупроводниковый диодный лазер с длиной волны 650 нм и мощностью 4 мВт. Лазерный луч попадая на разделитель луча делится на два, один луч направляется в опорное зеркало два, отражается, второй луч направляется в измерительное зеркало – керамический пьезоэлектрик с источником питания, который используется в качестве второго анализатора сигнала и подключается к осциллографу. Далее два луча через разделитель направляются в расширитель луча и попадают на фотодетектор, который также подключен к цифровому осциллографу.

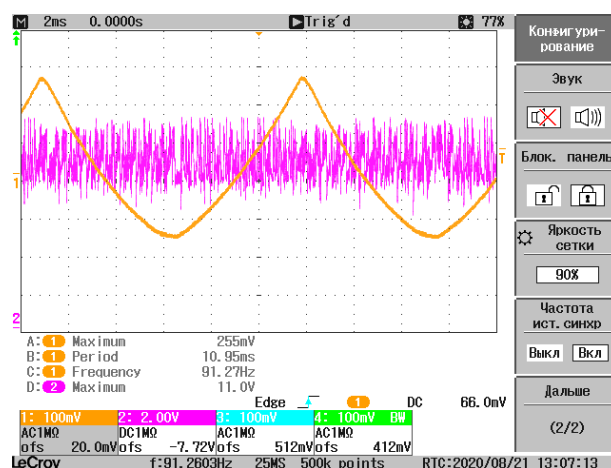
Разработанная лазерная измерительная система работает по принципу интерферометра А.

Майкельсона. Рабочая станция лазерной измерительной системы представлена на рисунке 2.

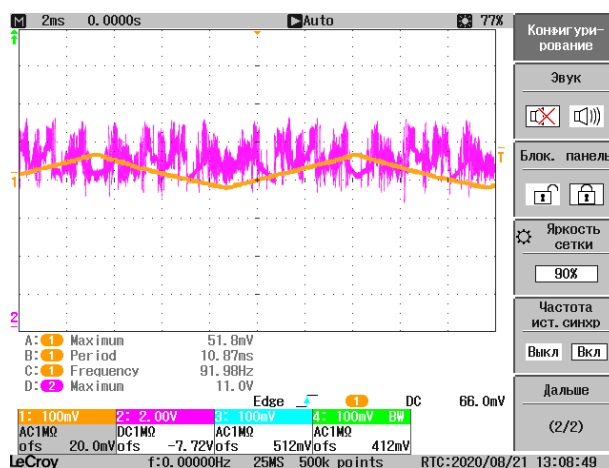
На рисунке 3 представлены осциллограммы сигналов колебания пьезоэлектрика (желтый) и фотодетектора (розовый), полученные при различных значениях параметрах сигнала пьезоэлектрика. Учитывая, что в процессе измерения существуют ряд неконтролируемых причин, влияющие на чувствительность лазерной измерительной системы, такие как механические, акустические и микросейсмические колебания, время измерения было увеличено до 25мс с регистрацией 500 тыс. точек для использования и анализа результатов долговременных измерений.



а) – размах амплитуды 5В, частота сигнала 182,5 Гц



б) – размах амплитуды 5В, частота сигнала 91,27 Гц



в) – размах амплитуды 1В, частота сигнала 91,98 Гц

Рисунок 3 – Осциллограмма колебания сигналов пьезоэлемента и фотодатчика, полученных с помощью лазерной измерительной системы

Из рисунка видно, что изменение размаха амплитуды и частоты вибросигнала керамического пьезоэлектрика приводит к ответному изменению формы регистрируемого сигнала фотодетектора. При этом, как показывает осциллограмма сигнала фотодетектора, во всех случаях, колебание остается постоянным вокруг 8-9В с максимумом в 11В. Обнаружено, что понижение частоты колебания пьезоэлектрика стабилизирует сигнал фотодетектора (рис. 3б), а дальнейшее уменьшение его размаха амплитуды приводит к уменьшению его частоты (рис. 3в). Таким образом можно заметить, что при колебании пьезоэлектрика в сравнительно высоких значениях частоты и амплитуды воздействие акустических и микросейсмических шумов, а также шумов от самого фотодетектора становится более выраженным в сигналах

фотодетектора, что усложняет процесс анализа измерения нано- и микросмещения пьезоэлектрика. Для того, чтобы убрать нежелательные шумы из сигнала фотодетектора и удобно выделять низкочастотную кинематическую составляющую разности фаз $\varphi(t)$ и искомого смещения пьезоэлектрика использует фильтрации. Для расчета зависимости смещения подвижного зеркала (пьезоэлектрика) от времени использовался фильтр Баттерворта с частотной характеристикой:

$$H(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^n}, \quad (1)$$

где f – частота, f_c – частота среза, а n – порядок фильтра, определяющий ширину переходной полосы.

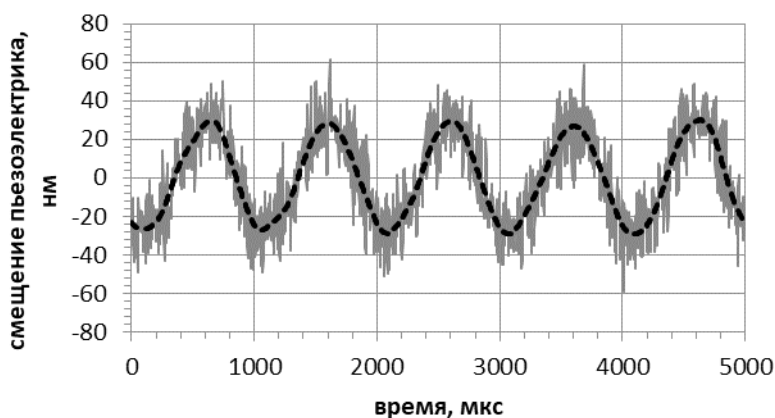


Рисунок 4 – Рассчитанная зависимость смещения пьезоэлектрика по времени

На рисунке 4 представлена временная зависимость смещения пьезоэлектрика. Обнаружено, что при определенном подборе параметров фильтра удастся не только подавить гармонику двойной несущей частоты, но и эффективно убрать шумы измерительной системы, наложенные на полезный сигнал.

Вывод

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты измерения колебания пьезоэлектрика с помощью лазерной измерительной системы, работающей по принципу интерферометра А. Майкельсона. Установлено, что изменение показателей вибросигнала

керамического пьезоэлектрика приводит к изменению формы сигнала фотодетектора. Для стабилизации сигнала фотодетектора и снижения воздействия различных шумов, в том числе шумов от самого фотодетектора необходимо понижение частоты и амплитуды колебания пьезоэлектрика, а также использование различных расчетных фильтрации для определения зависимости смещения пьезоэлектрика от времени.

Благодарность

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта AP05133211.

Литература

- 1 Bergamin A., Cavagnero G., and Mana G. A displacement and angle interferometer with subatomic resolution // *Rev. Sci. Instrum.* – Aug. 1993. – Vol. 64, No. 11. – P. 3076–3081.
- 2 Wang W.M., Boyle W.J.O., Grattan K.T.V., and Palmer A.W. Self-mixing interference in a diode laser: Experimental observations and theoretical analysis // *Appl. Opt.* – Mar. 1993. – Vol. 32, No. 9. – P. 1551–1558.
- 3 Lang R., and Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // *IEEE J. Quantum Electron.* – Mar. 1980. – Vol. 16, No. 3. – P. 347–355.
- 4 Wang W.M., Grattan K.T.V., Palmer A.W., and Boyle W.J.O. Self-mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications // *J. Lightwave Technol.* – Sep. 1994. – Vol. 12, No. 9. – P. 1577–1587.
- 5 Donati S., and Norgia M. Self-mixing interferometry for biomedical signals sensing, // *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* – Apr. 2014. – Vol. 20, No. 2. – P. 104–111.
- 6 Zhu K.Y., Guo B., Lu Y.Y., Zhang S.L., and Tan Y.D. Single-spot two-dimensional displacement measurement based on self-mixing interferometry // *Optica.* – Jul. 2017. – Vol. 4, No. 7. – P. 729–735.
- 7 Fei L.G., and Zhang S.L. The discovery of nanometer fringes in laser self-mixing interference // *Opt. Commun.* – Dec. 2006. – Vol. 273. – P. 226–230.
- 8 Cheng X., and Zhang S.L. Intensity modulation of VCSELs under feedback with two reflectors and self-mixing interferometer // *Opt. Commun.* – Apr. 2007. – Vol. 272, No. 2. – P. 420–424.
- 9 Wang L., Luo X., Wang X.L., and Huang W.C. Obtaining High Fringe Precision in Self-Mixing Interference Using a Simple External Reflecting Mirror. // *IEEE Photonics Journal.* – Jun. 2013. – Vol. 5, No. 3.
- 10 Guo D.M., Shi L.H., Yu Y.G., Xia W., and Wang M. Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple-diffraction // *Opt. Express.* – Dec. 2017. – Vol. 25, No.25. – P. 31394–31406.
- 11 Tan Y.D., Wang W.P., Xu C.X., and Zhang S.L. Laser confocal feedback tomography and nano-step height measurement // *Scientific Reports.* – Oct. 2013 – Vol. 3, Art. ID. 2971.
- 12 Zeng Z.L., Qu X.M., Tan Y.D., Tan R.T., and Zhang S.L. High-accuracy self-mixing interferometer based on single high-order orthogonally polarized feedback effects // *Opt. Exp.* – Jun. 2015. – Vol. 23, No. 13. – P. 16977–16983.
- 13 Azcona F.J., Atashkhouei R., Royo S., Astudillo J.M., and Jha A. A nanometric displacement measurement system using differential optical feedback interferometry // *IEEE Photo. Tech. Lett.* – Nov. 2013. – Vol. 25, No. 21. – P. 2074–2077.
- 14 Huang Z., Li C.W., Li S.Q., and Li D.Y. Equivalent wavelength self-mixing interferometry for displacement measurement // *Appl. Opt.* – Sep. 2016., – Vol. 55, No. 25. – P. 7120–7125.
- 15 Wei Z., Huang W.C., Zhang J., Wang X.L., Zhu H.L., An T., and Yu X. Obtaining scalable fringe precision in self-mixing interference using an even-power fast algorithm, // *IEEE Photonics Journal.* – Aug. 2017. – Vol. 9, No. 4. – Art. ID.6803211.
- 16 Sun H., Zhang Y., Chen H., Xiong Y., Huang W., Wang X., and Xu H. Large-range nanoscale self-mixing interferometer based on multiple reflections and Even-power Fast Algorithm // *Optics Communications.* – 15 July 2019. – Vol. 443. – P. 160–165.
- 17 Michelson A.A. On the Correction of Optical Surfaces // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* – 1918. – Vol. 4, No. 7. – P. 210–212.
- 18 Bluestein L.I. A linear filtering approach to the computation of the discrete Fourier transform // *Northeast Electronics Research and Engineering Meeting Record.* – 1968. – Vol. 10. – P.218–219.
- 19 Bianchi G., and Sorrentino R. *Electronic filter simulation & design.* // McGraw-Hill Professional – 2007. – 606 p.
- 20 Аханова Н.Е., Дарзбек С.А., Желкобаев Я.Э., Габдуллин М.Т., Ерланулы Е., Багрышев Д.Г. Разработка системы измерения в нанодиапазоне // *Вестник КазНУ, серия физическая.* – 2018. – Vol. 66, №3. – P.69-74..

References

- 1 A. Bergamin, G. Cavagnero, and G. Mana, *Rev. Sci. Instrum.*, 64 (11), 3076-3081 (1993).
- 2 W.M. Wang, W.J.O. Boyle, K.T.V. Grattan, and A.W. Palmer, *Appl. Opt.*, 32 (9), 1551-1558 (1993).
- 3 R. Lang, and K. Kobayashi, *IEEE J. Quantum Electron.*, 16 (3), 347–355 (1980).
- 4 W.M. Wang, K.T.V. Grattan, A.W. Palmer, and W.J.O. Boyle, *J. Lightwave Technol.*, 12 (9), 1577-1587 (1984).
- 5 S. Donati and M. Norgia, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 20 (2), 104-111 (2014).
- 6 K.Y. Zhu, B. Guo, Y.Y. Lu, S.L. Zhang, and Y.D. Tan, *Optica*, 4 (7), 729-735 (2017).
- 7 L.G. Fei and S.L. Zhang, *Opt. Commun.*, 273, 226-230 (2006).
- 8 X. Cheng and S.L. Zhang, *Opt. Commun.*, 272 (2), 420-424 (2007).
- 9 L. Wang, X. Luo, X.L. Wang, and W.C. Huang, *IEEE Photonics Journal*, 5 (3) (2013).
- 10 D.M. Guo, L.H. Shi, Y.G. Yu, W. Xia, and M. Wang, *Opt. Express*, 25 (25), 31394-31406 (2017).
- 11 Y.D. Tan, W.P. Wang, C.X. Xu, and S.L. Zhang, *Scientific Reports.*, 3:2971 (2013).
- 12 Z.L. Zeng, X.M. Qu, Y.D. Tan, R.T. Tan, and S.L. Zhang, *Opt. Exp.*, 23 (13), 16977-16983 (2015).

- 13 F.J. Azcona, R. Atashkooei, S. Royo, J.M. Astudillo, and A. Jha, IEEE Photo. Tech. Lett., 25 (21), 2074-2077 (2013).
- 14 Z. Huang, C.W. Li, S.Q. Li, and D.Y. Li, Appl. Opt., 55 (25), 7120-7125 (2016).
- 15 Z. Wei, W.C. Huang, J. Zhang, X.L. Wang, H.L. Zhu, T. An, and X. Yu, IEEE Photonics Journal, 9 (4):6803211 (2017).
- 16 H. Sun, Y. Zhang, H. Chen, Y. Xiong, W. Huang, X. Wang, and H. Xu, Optics Communications, 443, 160-165 (2019).
- 17 A.A. Michelson, Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 4 (7), 210-212 (1918).
- 18 L.I. Bluestein, Northeast Electronics Research and Engineering Meeting Record, 10, 218-219 (1968).
- 19 G. Bianchi and R. Sorrentino, McGraw-Hill Professional, 2007, p.606.
- 20 N.E. Akhanova, S.A. Darznek, J.E. Zhelkobaev, M.T. Gabdullin, Ye. Yerlanuly, and D.G. Batryshev, Recent Contributions to Physics, 66 (3), 69-74 (2018). (in Russ)