

Моделирование и измерение локального перемещения актюаторов в пьезокерамических линейках при уменьшении поперечного сечения

© В.В. Топоровский¹, В.В. Самаркин¹, А.В. Кудряшов¹, И.В. Галактионов¹, А.А. Панич², А.Ю. Малыхин²

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, 119334 Москва, Россия

² НКТБ „Пьезоприбор“, Южный федеральный университет, 344090 Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: topor@activeoptics.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

В окончательной редакции 16.10.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Произведено численное моделирование многослойных пьезоактюаторов с площадью поперечного сечения 2×2 mm. Было показано, что при использовании межэлектродной коммутации в пьезоактюаторах наблюдается локальное перераспределение максимумов поперечной деформации, что приводит к снижению механической прочности и надежности управляющих элементов. Были произведены пьезокерамические линейки с идентичными линейными размерами и измерены механические и электрофизические свойства разработанных устройств. Выявлено, что перемещение при управляющем напряжении 300 V снижается с 4 до $1.5 \mu\text{m}$ при использовании межэлектродного способа коммутации в сравнении с многослойными актюаторами большего сечения из-за снижения эффективной площади поляризации пьезоактюаторов. Были изготовлены пьезокерамические линейки с проволочным типом коммутации, где перемещение при управляющем напряжении 300 V составило $4.6\text{--}4.8 \mu\text{m}$.

Ключевые слова: корректоры волнового фронта, многослойные пьезоактюаторы, метод конечных элементов, адаптивная оптика.

DOI: 10.61011/OS.2023.11.57021.5092-23

1. Введение

Пьезокерамические элементы благодаря своим уникальным свойствам получили широкое применение во множестве научно-прикладных областей, так как они способны преобразовывать механическое напряжение в электрическую энергию (детекция сигналов [1], сбор энергии [2]) и наоборот (актюация [3]). Последний получил название обратного пьезоэлектрического эффекта, суть которого заключается в изменении линейных размеров компонента под действием управляющего напряжения. Данное явление нашло свое применение в различных сферах: активная оптика (сканаторы, моторизованные платформы и т.д.) [4], шаговые двигатели [5,6], регуляторы массового расхода [7]. Особое место в этом ряду занимает адаптивная оптика [8–12]. Высокая популярность применения пьезокерамических многослойных пакетов в качестве управляющих элементов для корректоров волнового фронта во многом продиктована их надежностью, высокой блокирующей силой и чувствительностью к прикладываемым напряжениям [13]. Тем не менее при создании электронных, в том числе оптоэлектронных устройств на базе пьезокерамических материалов, наблюдается тенденция к созданию миниатюрных, многофункциональных и энергоэффективных компонентов, что накладывает определенные ограниче-

ния на применение подобных элементов [14]. Более того, разработка таких устройств сопряжена с необходимостью оценки их механических и электрофизических свойств с высокой точностью [15]. Поэтому в последнее время получили активное распространение методы математического моделирования на основе метода конечных элементов [16].

2. Моделирование пьезокерамических линеек с площадью поперечного сечения 2×2 mm

При создании деформируемых зеркал пьезоактюаторного типа [17–20] с высоким пространственным разрешением управляющих элементов возникает проблема создания надежных многослойных актюаторов. Более того, подобные элементы должны генерировать значительную амплитуду перемещения. Чтобы проанализировать возможность снижения площади актюаторов и в то же время обеспечить надежность конструкции, были проведены теоретические и экспериментальные исследования.

Для выполнения теоретического эксперимента была выбрана программная среда математического моделирования ANSYS ввиду наличия современных решателей вычислительных задач с разреженными матрицами

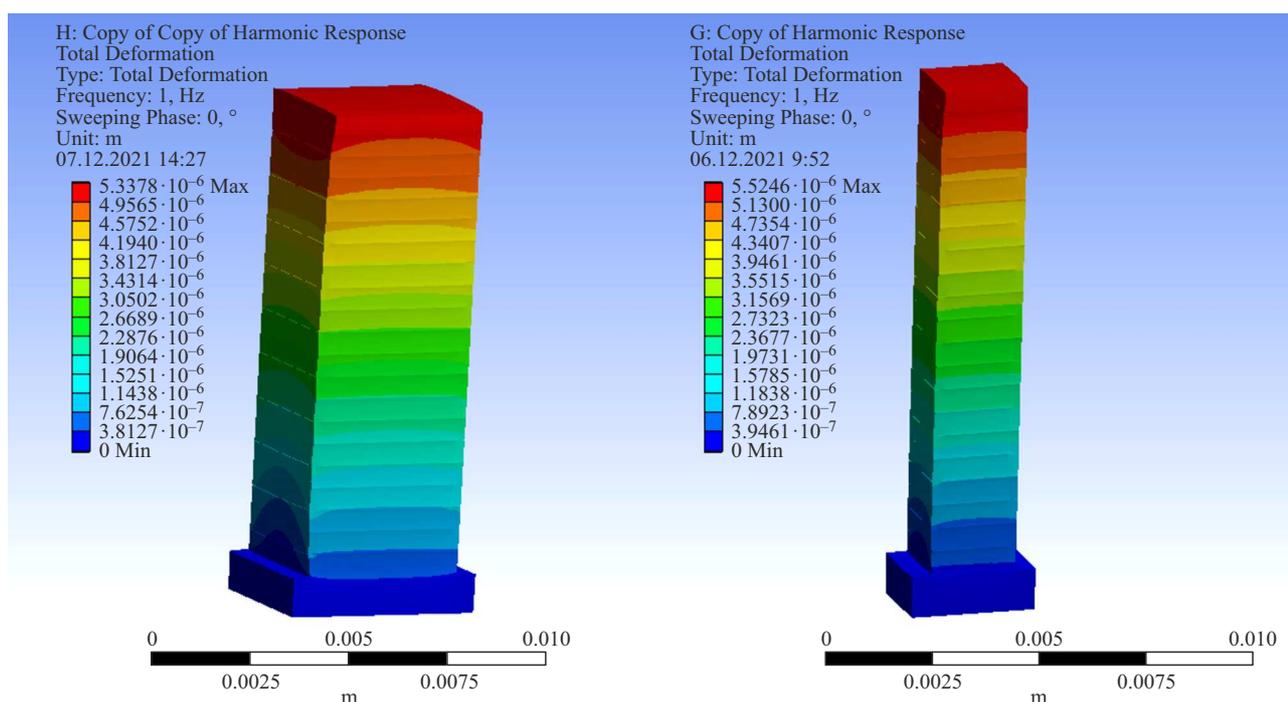


Рис. 1. Абсолютная деформация многослойных актюаторов с 20 активными слоями площадью 16 mm^2 (a) и 4 mm^2 (b) вдоль приложения напряжения 300 V .

большой размерности, что делает данный программный пакет незаменимым с точки зрения выполнения научно-исследовательских и конструкторских работ в области пьезоэлектрического приборостроения.

В данной программной системе был осуществлен сравнительный анализ для описания структуры многослойного пьезоактюатора при переходе от площади 16 mm^2 ($4 \times 4 \text{ mm}$) до 4 mm^2 ($2 \times 2 \text{ mm}$). Для исследования механических свойств был использован пьезокерамический материал ПКП-12. Электрофизические свойства данного материала представлены в [21].

В ходе выполнения анализа методом конечных элементов было выявлено, что абсолютная деформация многослойных актюаторов вдоль приложения напряжения равна $5.33 \mu\text{m}$ для элемента площадью 16 mm^2 и $5.52 \mu\text{m}$ для элемента площадью 4 mm^2 (рис. 1). Данные значения соответствуют условиям, в которых все слои актюатора полностью механически согласованы между собой.

В данной модели была использована межэлектродная методика коммутации пьезокерамических слоев, когда активные слои электрически соединены параллельно на чётных и нечётных слоях. Участок, не покрытый пленкой серебра толщиной $200 \mu\text{m}$, выступает в качестве изоляционной области. Тем самым активная площадь слоя снижается на 0.8 mm^2 в первом случае и на 0.4 mm^2 во втором, соответственно эффективная площадь поляризации снижается до 14.4 mm^2 в первом случае и до 3.2 mm^2 во втором. В результате этого наряду с появлением локальных областей напряженно-

сти наблюдается снижение прочностных характеристик актюаторов. Наглядно этот эффект показан на рис. 2. В ходе выполнения моделирования было показано, что в случае рабочей площади актюатора 14.4 mm^2 наблюдается эффект „бочки“ на поперечной деформации, что свидетельствует о том, что сборка работает как единое целое. Соответственно можно рассматривать такой актюатор как монолитный объект. При рабочей площади в 3.2 mm^2 наблюдается локальное распределение максимумов поперечной деформации, что приводит к снижению механической прочности и соответственно к уменьшению надёжности всей системы.

Также данный факт был подтвержден результатами моделирования послышного давления (рис. 3). При площади 14.4 mm^2 максимум давления распределяется по всей площади пьезоэлектрического слоя, что не наблюдается при площади поперечного сечения 3.2 mm^2 , где давление сконцентрировано на краях пьезослоёв (рис. 3, b).

Было показано, что создание линеек актюаторов с меньшей площадью поперечного сечения приводит к возникновению локальных концентраций давления на краях элементов и не позволяет использовать подобные элементы в качестве управляющих элементов в деформируемых зеркалах пьезоактюаторного типа.

Существуют различные модификации создания электрической коммутации многослойных актюаторов: межэлектродная, сквозная, щелевая, межэлектродная с плавающим электродом и проволоочная [22]. С точки зрения создания больших партий многослойных актюа-

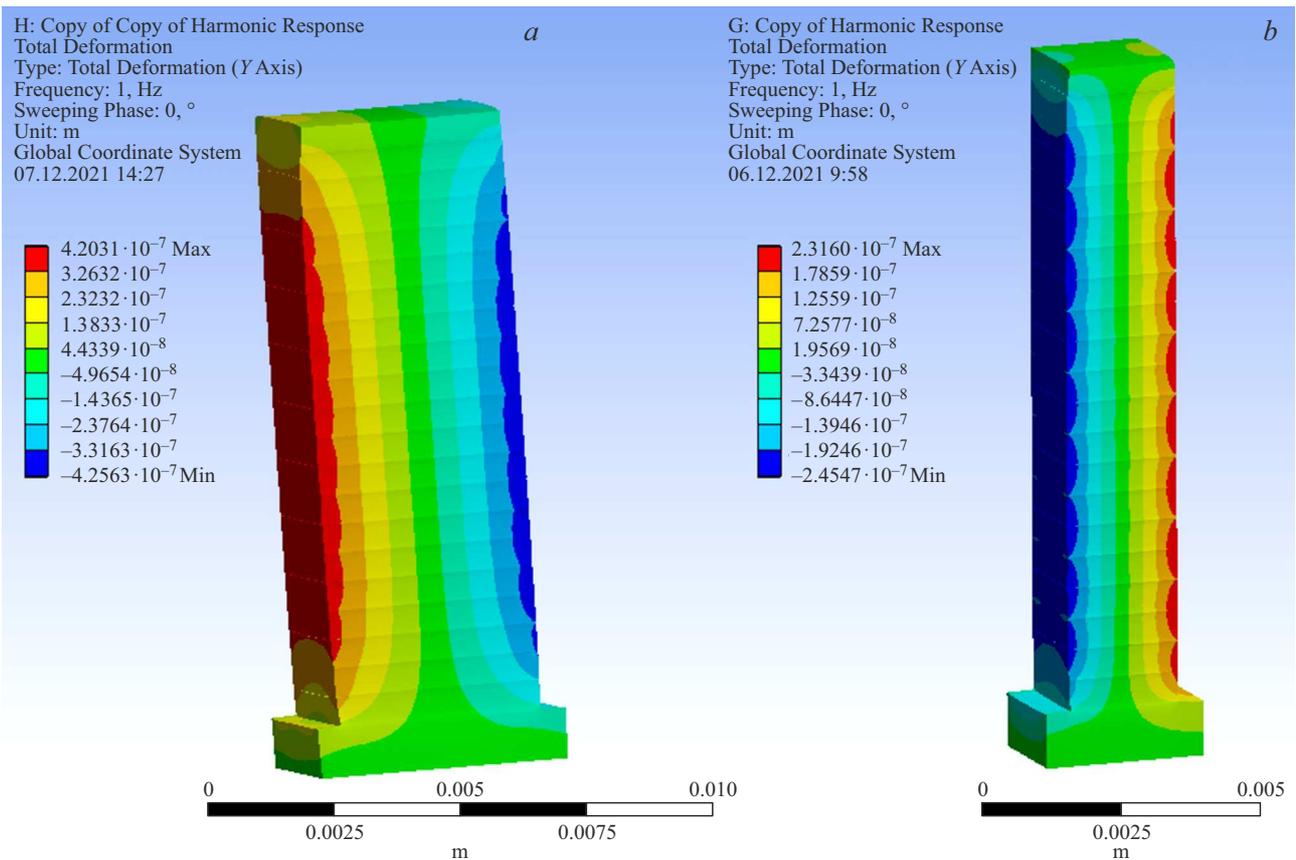


Рис. 2. Модель поперечной деформации пьезокерамического актюатора, содержащего в себе 20 активных слоёв площадью 16 mm^2 (a) и 4 mm^2 (b).

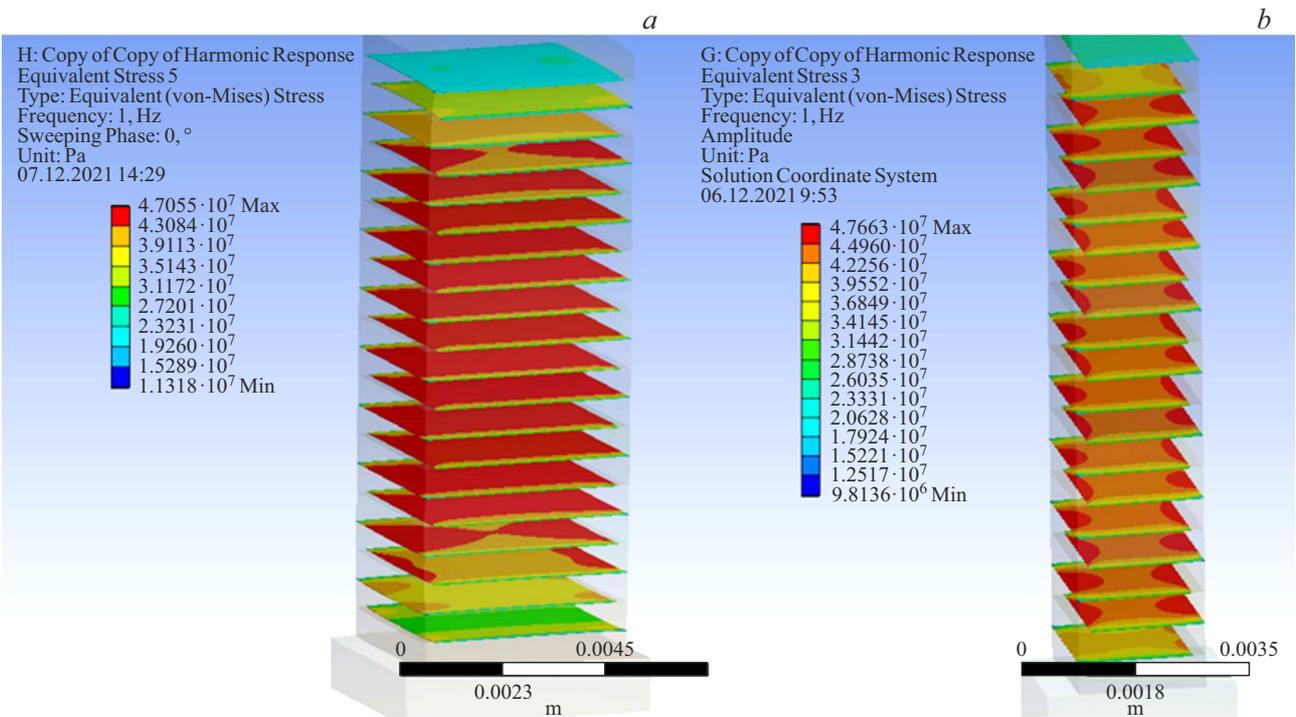


Рис. 3. Модель послойного распределения давления для актюаторов площадью 16 mm^2 (a) и 4 mm^2 (b).

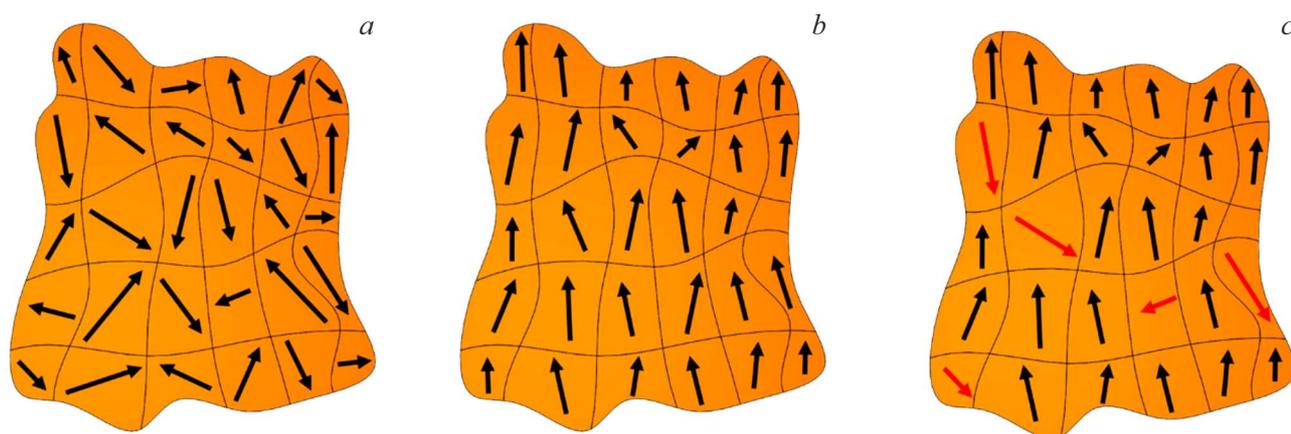


Рис. 4. Поляризация доменов в пьезокерамическом материале: (а) случайное распределение, (б) упорядоченное распределение, (с) эффект бокового механического зажатия доменов.

торов наиболее часто используемым методом является межэлектродная коммутация ввиду простоты данного способа. Для проверки модельного эксперимента, который показал возникновение локальных концентраций давления на краях элементов, были изготовлены линейки актюаторов с межэлектродным типом коммутации.

Размеры актюатора были близки к использованным при моделировании и составили $4 \times 4 \text{ mm}$ (площадь поверхности 16 mm^2) и $2.5 \times 2 \text{ mm}$ (площадь поверхности 5 mm^2). Размер $2.5 \times 2 \text{ mm}$ обусловлен технологическим пределом оборудования, используемого в изготовлении данного типа актюаторов.

Уменьшение площади поперечного сечения актюатора в линейке с 16 mm^2 ($4 \times 4 \text{ mm}$) до 5 mm^2 ($2.5 \times 2 \text{ mm}$) привело к снижению перемещения отдельного актюатора с $4 \mu\text{m}$ до $1.5 \mu\text{m}$ при напряжении 300 V . Это связано с уменьшением эффективного сечения слоя актюатора и бокового зажатия пакета вследствие неоднородной деформации на каждой пластине пакета (рис. 4). Использование всей площади активных слоёв пьезокерамики может быть достигнуто путем изменения способа коммутации. Данный метод, несмотря на относительную дороговизну в сравнении с межэлектродным способом коммутации и трудоемкость процесса, позволяет увеличить равномерность распределения механических нагрузок внутри актюатора и повысить срок эксплуатации пьезоэлементов [22]. Поэтому пришлось использовать технологию проволочной коммутации электродов в многослойном пакете актюатора. При анализе электрофизических свойств разработанных актюаторов было выявлено, что при управляющем напряжении 300 V амплитуда деформации лежит в диапазоне от 4.6 до $4.8 \mu\text{m}$. В модельных и экспериментальных данных наблюдается расхождение в значении локальной деформации, так как при изготовлении пьезоэлементов существует ряд факторов, влияющих на их производительность: точность нанесения проводящей пленки серебра, возникновение локальных пор в керамическом материале и т. д.

Заключение

В ходе работы был выполнен анализ методом конечных элементов на возможность использования пьезокерамических актюаторов с уменьшенной площадью поперечного сечения. Тем не менее перемещение при управляющем напряжении 300 V снижается с $4 \mu\text{m}$ до $1.5 \mu\text{m}$ в сравнении с многослойными актюаторами большего сечения из-за уменьшения эффективной площади поляризации пьезоэлементов ввиду использования межэлектродного способа коммутации. Поэтому были изготовлены пьезокерамические линейки с проволочным типом коммутации. В этом случае удалось увеличить перемещение при управляющем напряжении 300 V до значения $4.6\text{--}4.8 \mu\text{m}$.

Разработанные пьезоэлементы могут быть использованы в качестве управляющих элементов для пьезоактюаторных деформируемых зеркал с высоким пространственным разрешением.

Финансирование работы

Работа выполнена за счёт средств гранта Российского научного фонда # 19-19-00706П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Aabid, M. Hrairi, S.J.M. Ali, Y.E. Ibrahim. ACS Omega, **8** (3), 2844–2860 (2023). DOI: 10.1021/acsomega.2c06573
- [2] A. Aabid, M.A. Raheman, Y.E. Ibrahim, A. Anjum, M. Hrairi, B. Parveez, N. Parveen, J. Mohammed Zayan. Sensors, **21**, 4145 (2021). DOI: 10.3390/s21124145
- [3] J. Yang, Q. Zhang, T. Xu. Appl. Sci., **9**, 4637 (2019). DOI: 10.3390/app9214637

- [4] H. Chaudhary, S. Khatoon, R. Singh, A. Pandey. 3rd International Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy, and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH), **1–5** (2018). DOI: 10.1109/CIPECH.2018.8724374
- [5] B. Koc, S. Kist, A. Hamada. *Actuators*, **12**, 136 (2023). DOI: 10.3390/act12040136
- [6] Q. Duan, Y. Zheng, J. Jin, N. Hu, Z. Zhang, H. Hu. *Micromachines*, **14**, 267 (2023). DOI: 10.3390/mi14020267
- [7] Y. Zhang, X. Wang, X. Fu, Z. Zhang, Z. Li, Z. Li. *Proceedings of the International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering 2022*, **10**, 363–375 (2023). DOI: 10.2991/978-94-6463-022-0_31
- [8] V. Toporovsky, A. Kudryashov, V. Samarkin, J. Sheldakova, A. Rukosuev. *Proc. SPIE*, **10898**, 1089809 (2019). DOI: 10.1117/12.2510144
- [9] V. Toporovsky, A. Kudryashov, A. Skvortsov, A. Rukosuev, V. Samarkin, I. Galaktionov. *Photonics*, **9** (5), 321 (2022). DOI: 10.3390/photonics9050321
- [10] K. Ahn, H.-G. Rhee, H.-S. Yang, H. Kihm. *Opt. Express*, **26**, 9724–9739 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.009724
- [11] D. Alaluf, R. Bastaitis, K. Wang, M. Horodincea, G. Martic, B. Mokrani, A. Preumont. *Appl. Opt.*, **57**, 3629–3638 (2018). DOI: 10.1364/AO.57.003629
- [12] V. Samarkin, A. Alexandrov, I. Galaktionov, A. Kudryashov, A. Nikitin, A. Rukosuev, V. Toporovsky, J. Sheldakova. *J. Appl. Sci.*, **12**, 1144 (2022). DOI: 10.3390/app12031144
- [13] Y.-G. Kim, J.-H. Song, S. Hong, S.-H. Ahn. *Flex Electron*, **6**, 52 (2022). DOI: 10.1038/s41528-022-00186-4
- [14] S.S. Won, H. Seo, M. Kawahara, S. Glinsek, J. Lee, Y. Kim, C.K. Jeong, A.I. Kingon, S.-H. Kim. *Nano Energy*, **55**, 182–192 (2019). DOI: 10.1016/j.nanoen.2018.10.068
- [15] S.Q. Zhang, Y.S. Gao, G.Z. Zhao, H.Y. Pu, M. Wang, J.H. Ding, Y. Sun. *Composite Structures*, **278**, 114703 (2021). DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114703
- [16] V.-T. Nguyen, P. Kumar, J.Y.C. Leong. *Computation*, **6**, 60 (2018). DOI: 10.3390/computation6040060
- [17] V. Toporovsky, V. Samarkin, A. Kudryashov, A. Panich, A. Sokalio, A. Malykhin, J. Sheldakova. *Proc. SPIE*, **11987**, 119870M (2022). DOI: 10.1117/12.2614509
- [18] V.V. Samarkin, A.G. Alexandrov, I.V. Galaktionov, A.V. Kudryashov, A.N. Nikitin, A.L. Rukosuev, V.V. Toporovsky, Yu.V. Sheldakova. *Quantum Electronics*, **52**(2), 187–194 (2022). DOI: 10.1070/QEL17989
- [19] L. Sun, Y. Zheng, C. Sun, L. Huang. *Opt. Express*, **26**, 23613–23628 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.023613
- [20] Y. Zheng, Y. Zhuang, S. Lin, D. Wang, Y. Zhang, L. Huang. *Front. Phys.*, **11**, 1136349 (2023). DOI: 10.3389/fphy.2023.1136349
- [21] В. Топоровский, В. Самаркин, А. Кудряшов, И. Галактионов, А. Малыхин, А. Панич. *Известия РАН. Серия физическая*, **87**, 1637–1641 (2023). DOI: 10.3103/S1062873823703914 [V.V. Toporovsky, V.V. Samarkin, A.V. Kudryashov, I.V. Galaktionov, A.Yu. Malykhin, A.A. Panich. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **87**, 1697–1701 (2023)].
- [22] J. Pritchard, C.R. Bowen, F. Lowrie. *British Ceramic Transactions*, **100**, 265–273 (2001). DOI: 10.1179/bct.2001.100.6.265