

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.586.54

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ
МИКРОПОЗИЦИОНЕРОВ В ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ЗОНДОВОЙ
СТАНЦИИ¹

©2026 Т.А. Овчинников^а, А.С. Паньков^а, Р.С. Пономарев^а*,
Е.С. Новиков^б, И.С. Черепанов^а, В.А. Ирха^а

^аПермский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 614068, Пермь, ул. Букирева 15

^бООО “Инфофокус”

Россия, 614066, Пермь, ул. Стахановская, 64П

*e-mail: kuperok2003@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Предложена методика измерения разрешения линейных микропозиционеров, основанная на использовании волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо. Методика адаптирована под требования международного стандарта, она позволяет измерить шаг перемещения на участке длиной 50 мкм с нанометровым разрешением. Экспериментально исследованы три микропозиционера под управлением промышленных контроллеров отечественного и импортного производства. Показано, что минимальный возможный шаг позиционирования составляет 19.5 нм при применении обоих контроллеров. Продемонстрирована возможность эффективного применения отечественного контроллера в задачах автоматического выравнивания оптических элементов ввода и вывода излучения в автоматизированных зондовых станциях для тестирования фотонных интегральных схем.

Ключевые слова: волоконно-оптический интерферометр, микропозиционер, разрешение позиционирования, оптоэлектронная зондовая станция, интегральная фотоника.

1. ВВЕДЕНИЕ

Интегральная фотоника является одной из основ современных систем передачи информации с помощью волоконно-оптических линий связи. Благодаря субмикронным размерам базовые оптические элементы – такие как волноводы, фотодетекторы и модуляторы – эффективно объединяются в единую фотонную интегральную схему (ФИС) [1]. Преимущества ФИС обусловлены высокой скоростью передачи сигнала,

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорики 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

устойчивостью к электромагнитным помехам, малыми потерями при передаче сигнала на большие расстояния и возможностями параллельной передачи множества потоков информации за счет методов спектрального уплотнения [2]. Благодаря своим особенностям ФИС находят применение в проектировании биосенсоров [3], технологиях квантового распределения ключей [4], способах оптического хранения данных [5] и аппаратных ускорителях для задач искусственного интеллекта [6].

Важным этапом технологического цикла производства в интегральной фотонике является тестирование чипов ФИС в составе пластины или по отдельности. Современные чипы изготавливаются на кристаллических пластинах диаметром до 300 мм, способных вместить тысячи идентичных чипов ФИС [7, 8]. Потребность в точных, воспроизводимых и масштабируемых измерениях за разумное время на всех этапах производства исключает ручное тестирование и требует применения автоматизированных решений, в частности, автоматизированных оптоэлектронных зондовых станций, позволяющих вводить и выводить излучение в волноводы ФИС с помощью оптических зондов, установленных на высокоточных моторизованных позиционерах. Согласно работе [9], затраты на тестирование занимают до 30% от общей стоимости производства ФИС, и разработка доступных автоматизированных коммерческих решений тестирования является актуальной научной, технической и технологической задачей [9–11].

Автоматизированная зондовая станция включает в себя ряд разнородных подсистем, объединенных единой системой управления, в частности, системы позиционирования оптических, электрических и радиочастотных зондов, систему для перемещения исследуемой пластины или одиночного образца, систему технического зрения [12], систему управления, реализованную в виде интерфейса на ПК [10], а также системы виброизоляции и стабилизации температуры исследуемого образца [13]. Наиболее сложной подсистемой является система позиционирования оптических зондов, в которой предъявляются высокие требования к величине минимального перемещения зонда, которая для корректности проведения измерений не должна превышать $1/10$ от характерного размера поперечного сечения канального волновода. Для кремниевой фотоники такое значение составляет около 50 нм.

Перемещения объектов в диапазоне десятков нанометров реализуются с помощью пьезопозиционеров и шаговых двигателей высокого класса точности. От их корректной работы зависит результат, получаемый при выравнивании оптических зондов относительно волноводов чипа ФИС. В связи с этим используемые микропозиционеры в зондовых станциях нуждаются в надежных и воспроизводимых методах контроля точности перемещения подвижных элементов.

Для определения точного местоположения объекта относительно опорной точки существует ряд подходов, наиболее точными из которых являются интерферометрические методы с последующими вычислениями оптической разности хода, варианты реализации которых подробно рассмотрены в обзоре специалистов из Research Center for Optical Fiber Sensing (Китай) [14]. Среди отечественных авторов следует отметить работы специалистов СПбПУ имени Петра Великого (Л.Б. Лиокумович, Н.А. Ушаков), показавших, что волоконно-оптические системы измерения перемещения с внешним резонатором Фабри-Перо могут достигать пикометровых значений разрешения в случае применения соответствующей математической обработки экспериментальных сигналов [15–16]. Кроме оптических интерферометрических датчиков, в промышленных задачах также нередко применяются емкостные и вихретоковые датчики приближения [17]. В области интегральной фотоники, в частности, при проектировании и эксплуатации оптоэлектронных зондовых станций применение интерферометрических методов выглядит наиболее логичным, т.к. в самой конструкции зондовой станции уже реализована вся измерительная схема, включая системы высокоточного перемещения, высококачественные источники оптического сигнала и измерители оптической мощности.

В настоящей работе в рамках разработки автоматизированной оптоэлектронной зондовой станции предложена методика измерения разрешения линейных шаговых микропозиционеров с использованием волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с внешним резонатором. Методика разработана с учетом требований стандарта [18], регламентирующего точность и повторяемость позиционирования осей прецизионного оборудования. Проведено сравнительное испытание трех линейных микропозиционеров Suruga Seiki PG750M-RA-T-J (Япония) (по одному на оси X , Y , Z) с использованием контроллеров Suruga Seiki (Япония) и mDrive (Россия).

Цель исследования заключалась в подтверждении соответствия реальных характеристик микропозиционеров заявленным паспортным характеристикам под управлением различных типов контроллеров.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1, реализован волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо, в котором одна из отражающих поверхностей представляет собой неподвижное зеркало, а вторая отражающая поверхность образована торцом вклеенного в керамическую ферулу одномодового оптического волокна типа SMF-28, закрепленного в держателе, установленном на исследуемом микропозиционере. Перемещение позиционера в ходе эксперимента

изменяет базу интерферометра, что приводит к формированию интерференционной картины при отражении излучения.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Фотографии частей экспериментальной установки, представляющей собой макет оптоэлектронной зондовой станции, приведены на рис. 2.

Рис. 2. Держатель зонда с ферулой для вклейки оптического волокна (а), он закреплен на исследуемом позиционере (б) напротив зеркала (в)

Оптическое излучение от узкополосного источника Golight OS-TL с мощностью 5 дБм и длиной волны $\lambda = 1550$ нм вводилось в систему через оптический циркулятор. До начала измерений источник излучения прогревался в течение двух часов, что обеспечивало отклонение выходной оптической мощности не более 0.1 дБм на заданной длине волны во время всего эксперимента. Исходя из измеренного спектра источника излучения, подавление его боковых гармоник составляло не менее 60 дБ, что позволяет считать излучение монохроматическим.

Отраженный сигнал направлялся в измеритель оптической мощности Fiberpro PM-2100, который регистрировал изменение оптической мощности в зависимости от положения торца оптического зонда. Максимальный ход микропозиционера в эксперименте составлял $L = 50$ мкм, что соответствует характерным перемещениям при тестировании ФИС.

В настоящий момент в области интегральной фотоники отсутствуют единые нормативные документы, регламентирующие методики оценки разрешения и точности перемещения микропозиционеров. В связи с этим в рамках данного исследования был применен международный стандарт ISO 230-2–2016 [18], определяющий требования к точности и повторяемости позиционирования линейных осей прецизионного оборудования. Согласно стандарту, для линейных осей длиной менее 2000 мм необходимо использовать не менее пяти заданных позиций на метр, каждая из которых должна быть достигнута по пять раз в обоих направлениях движения. Несмотря на то, что стандарт разработан для макроскопического оборудования, заложенные в нем метрологические принципы остаются универсальными. В настоящей работе методика адаптирована к микроскопическому масштабу измерений ($L = 50$ мкм) путем кратного увеличения плотности задаваемых позиций до аппаратно-программного предела контроллеров. Поскольку в технических характеристиках используемого микропозиционера полный шаг двигателя составляет 5 мкм на импульс [19], а обе исследуемые системы управления поддерживают режим деления шага с максимальным значением $1/256$, было задано 256

позиций на каждые 5 мкм хода. Такой подход позволил корректно оценить величину разрешения хода микропозиционеров. Общее количество измерений в цикле составило 2560. Минимальный расчетный единичный шаг микропозиционера составил $dx=5000/256\approx 19.5\text{ нм}$, а время выдержки в каждой точке $t=0.1\text{ с}$, что обеспечивало механическую стабилизацию системы и было достаточно для регистрации оптического сигнала измерителем оптической мощности.

Испытание проводилось в закрытом изолированном от прямых солнечных лучей и потоков воздуха помещении при температуре 22°C . Перед началом измерений микропозиционер был прогрет серией холостых испытаний. Полный цикл включал пять повторяющихся проходов «от зеркала – к зеркалу». Схема движения позиционера во время проведения измерений приведена на рис. 3.

Рис. 3. Схема движения микропозиционера во время проведения измерений:
а – номер позиции, б – цикл движения, в – заданные позиции

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 4 представлена интерференционная картина, формируемая при движении от зеркала в одном из циклов измерений по оси X с зависимостью мощности оптического сигнала от координаты микропозиционера, где синие точки – экспериментальные данные, сплошная линия – аппроксимация фильтром Гаусса, а красные точки соответствуют максимумам сигнала. Из представленного графика можно видеть, что выбранный единичный шаг хода микропозиционера $dx\approx 19.5\text{ нм}$ позволяет с достаточной точностью фиксировать в эксперименте отдельные интерференционные пики.

Рис. 4. Интерференционная картина (синие точки – экспериментальные данные, прямая – аппроксимация фильтром Гаусса, красные точки – максимумы сигнала)

Для оценки стабильности движения оптических зондов под управлением различных контроллеров находилось среднее арифметическое расстояний между пиками интерференционной картины при пяти циклах измерений $\Delta(x, y, z)$, значение которого далее откладывалось в зависимости от координаты положения микропозиционера (x, y, z) для двух типов движения – от зеркала / к зеркалу при тестировании линейного позиционера вдоль осей X, Y, Z (рис. 5).

Рис. 5. Зависимости разностей между соседними пиками интерференционной картины $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ от координат микропозиционера x, y, z вдоль осей X, Y, Z под управлением контроллеров MDrive (а), Suruga Seiki (б)

Как показывают результаты вычислений, контроллер Suruga Seiki обеспечивает меньшую амплитуду разброса расстояний между максимумами интерференционной

картины и демонстрирует менее выраженную периодичность. Однако для обоих контролеров среднее отставание максимумов друг от друга является одинаковым, $\Delta(x, y, z) = 0.79 \pm 0.02$ мкм.

Интенсивность монохроматического излучения, отраженного в интерферометре Фабри-Перо, описывается формулой Эйри [20]

$$I = I_0 \left(1 - \frac{(1-r)(1-R)}{1+rR-2\sqrt{rR}\cos\delta} \right),$$

где I_0 – интенсивность падающей волны, $\delta = 4\pi L / \lambda$ – разность фаз между соседними лучами, r и R – амплитудные коэффициенты отражения у торца волокна и зеркала, соответственно. Максимум интенсивности достигим при $\delta = 2\pi m$ (m – целое число) или $\Delta L_{\max} = \lambda / 2 = 0.775$ мкм, что хорошо согласуется с полученными результатами для $\Delta(x, y, z)$.

Перейдем к поиску элементарного шага dx на основе исследования полученных интерферограмм. Для каждого цикла известны расстояние между максимумами интерференционной картины и количество совершенных измерений в этом интервале. Взяв отношение, вычислим разрешение хода микропозиционера RES по оптическим данным:

$$RES_i = \frac{\Delta i}{n_i}, \quad i = x, y, z,$$

где n_i – количество точек измерения между соседними максимумами. Для двух контролеров разрешение микропозиционера по трем осям измерений составило $RES_i = 19.5$ нм/шаг, что для одного шага с точностью до десятых нанометра совпадает с назначенным в программе элементарным шагом $dx = 5000 / 256 \approx 19.5$ нм.

Оценим погрешность определения координат максимумов интерференционной картины, которая складывается из двух независимых составляющих: неопределенности дискретизации и неопределенности, вносимой процедурой сглаживания функцией Гаусса. Первое слагаемое обусловлено тем, что истинное положение пика может находиться в любом месте внутри интервала dx между соседними точками измерения, что при равномерном распределении дает стандартную неопределенность $\sigma_{discr} = dx / \sqrt{12}$. Второе слагаемое связано с тем, что применение фильтра Гаусса с параметром σ приводит к размыванию координаты положения пика на величину, характеризуемую шириной пика на полувысоте $FWHM$, что при конечном отношении сигнал/шум SNR для числа точек измерения N дает погрешность определения центра пика $\sigma_{center} = FWHM / 2.355 \cdot SNR \cdot \sqrt{N}$.

Тогда суммарная погрешность определения положения отдельного максимума примет вид [21]

$$\sigma_{total} = \sqrt{\left(\frac{dx}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{FWHM}{2.355 \cdot SNR \cdot \sqrt{N}}\right)^2}.$$

Для выбранного единичного шага $dx \approx 19.5$ нм, ширины пика на полувысоте $FWHM \approx \lambda / 4 = 387.5$ нм, отношения сигнал/шум $SNR \approx 10$, количества точек данных $N = 20$ с учетом усреднения по пяти последовательным измерениям погрешность определения положений максимумов интерференционной картины составит $\sigma_{total} / \sqrt{5} \approx 3.0$ нм. Полученное значение погрешности определения максимумов позволяет найти относительную погрешность определения разрешения $\delta_{RES} = \sigma_{total} / \Delta L_{max} \cdot 100\% < 1\%$, что является незначительным при определении разрешающей способности микропозиционеров.

Таким образом, предложенная методика позволила измерить величину элементарного шага dx микропозиционера и количественно удостовериться в правильности перемещения относительно назначаемого шага. Полученные результаты показывают возможность равноценного с точки зрения пространственного разрешения использования контроллеров mDrive (Россия) и Suruga Seiki (Япония).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была разработана и экспериментально апробирована простая методика измерения разрешения линейных микропозиционеров с использованием волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо. Предложенная методика обеспечивает разрешение измерений до десятых долей нанометра и позволяет оценить точность позиционирования в условиях, приближенных к реальным задачам тестирования фотонных интегральных схем. Экспериментально подтверждено соответствие рабочих характеристик микропозиционеров Suruga Seiki PG750M-RA-T-J заявленным паспортным характеристикам при управлении комплектными контроллерами Suruga Seiki (Япония) и альтернативным вариантом mDrive (Россия).

Полученный результат, который на первый взгляд может показаться тривиальным – реальное движение оптического зонда на позиционере соответствует заявленному в паспорте, – является определяющим с точки зрения реализации управляющих алгоритмов работы зондовой станции, с помощью которых происходят поиск максимума оптического сигнала и паспортизация чипов на исследуемой пластине. Величина минимального шага позиционирования является ключевым параметром алгоритма, ошибка в котором может

привести к невозможности эффективного поиска максимума оптического сигнала. Таким образом, независимое подтверждение разрешения позиционеров является важным этапом в проектировании любой высокоточной мехатронной системы.

Важное значение также имеет демонстрация высокой точности позиционирования при использовании отечественного контролера mDrive (Россия), который показал сопоставимые с промышленным аналогом результаты по разрешающей способности и стабильности хода. Это снижает зависимость от импортных компонентов и открывает перспективы для создания полностью российских автоматизированных зондовых станций для тестирования компонентов фотонных интегральных схем.

Предложенная методика может стать основой стандартизированного подхода к метрологической аттестации систем микроперемещений в области электроники и интегральной фотоники и способствовать развитию отечественных решений в сфере производства оптоэлектронного оборудования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №24-91-21002

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Салех Б., Теїх М.* Оптика и фотоника. Принципы и применения. Т. 2. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. 784 с.
2. *Butt M.A., Janaszek B., Piramidowicz R.* Sensors International. 2025. V. 6. P. 100326. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2025.100326>.
3. *Angelopoulou M., Makarona E., Salapatias A. et al.* Biosensors and Bioelectronics. 2022. V. 215. P. 114570. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114570>.
4. *Li W., Zhang L., Tan H. et al.* Nature photonics. 2023. V. 17. P. 416. <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01166-4>.
5. *Lin X., Liu J., Hao J. et al.* Opto-Electronic Advances. 2020. V. 3. P. 190004. <https://doi.org/10.29026/oea.2020.190004>.
6. *Xu D., Ma Y., Jin G. et al.* Engineering. 2025. V. 46. P. 186. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.08.016>.
7. *Elsheikh O.E., Swillam M.A.* Scientific Reports. 2024. V. 14. P. 3780. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54016-w>.
8. *Khajavi S., Melati D., Cheben P. et al.* Scientific Reports. 2022. V. 12. P. 18808. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23460-x>.

9. *Latkowski S., Pustakhod D., Yao W., et al.* 20th International Conference on Transparent Optical Networks. Bucharest. 2018. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8473652>.
10. *Schmidt C., Hinum-Wagner J.W., Klambauer R., et al.* SoftwareX. 2024. V. 27. P. 101879. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101879>.
11. *Barcaya M.C.B., Tosi M., Ortiz L.L., et al.* 2023 XX Workshop on Information Processing and Control. Obera. Argentina. 2023. P. 1. <https://doi.org/10.1109/RPIC59053.2023.10530688>.
12. *Butt M.A., Mateos X., Piramidowicz R.* Physics Letters A. 2024. V. 516. P. 129633. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129633>.
13. *Sherawat V., Kalra Y., Bokolia R. et al.* Optics Communications. 2025. V. 586. P. 131875. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2025.131875>.
14. *Zhu, C., Zheng, H., Ma, L. et al* IEEE Sensors J. 2023, V. 23. №7, P. 6406. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3244820>.
15. *Ушаков Н.А.* Прецизионные оптические измерения с использованием спектральной интерферометрии: дис. д-ра физ.-мат. наук: 1.3.4. Санкт-Петербург, 2024. 264 с.
16. *Ushakov N., Liokumovich L.* Appl. Opt. 2014. V. 53 № 23. P. 5092. <https://doi.org/10.1364/AO.53.005092>.
17. *Ye Y., Zhang C., He C. et al.* IEEE Access. 2020. V. 8. P. 45325. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977716>.
18. *ГОСТ ISO 230-2-2016.* Нормы и правила испытания станков. Часть 2. Определение точности и повторяемости позиционирования осей станков с числовым программным управлением. М.: Стандартиформ, 2016. 35 с.
19. *Suruga Seiki Co., Ltd.* PG750M-RA-T-J Motorized Linear Stage: Technical Specifications [Электронный ресурс]. URL: <https://eng.surugaseiki.com/products/x-axis-motorized-stage/products?katashiki=PG750M-RA-T-J> (дата обращения: 13.05.2026).
20. *Бутиков Е. И.* Оптика: учеб. пособие для студентов физ. специальностей вузов. СПб: Невский Диалект. 2003. 479 с.
21. *Bobroff N.* Review of Scientific Instruments. 1986. V. 57. №6. P. 1152. <https://doi.org/10.1063/1.1138619>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Рис. 2. Держатель зонда с ферулой для вклейки оптического волокна (**а**), он закреплен на исследуемом позиционере (**б**) напротив зеркала (**в**)

Рис. 3. Схема движения микропозиционера во время проведения измерений: **а** – номер позиции, **б** – цикл движения, **в** – заданные позиции

Рис. 4. Интерференционная картина (синие точки – экспериментальные данные, прямая – аппроксимация фильтром Гаусса, красные точки – максимумы сигнала)

Рис. 5. Зависимости разностей между соседними пиками интерференционной картины Δx , Δy , Δz от координат микропозиционера x , y , z вдоль осей X , Y , Z под управлением контроллеров MDrive (**а**), Suruga Seiki (**б**)

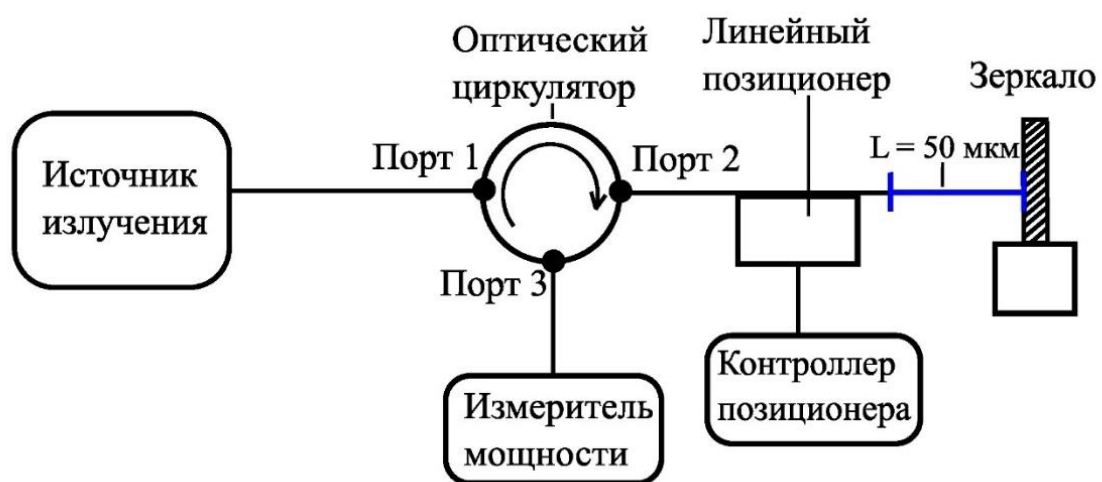
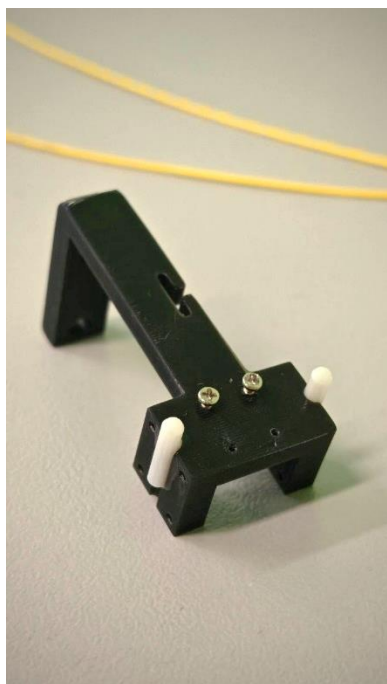
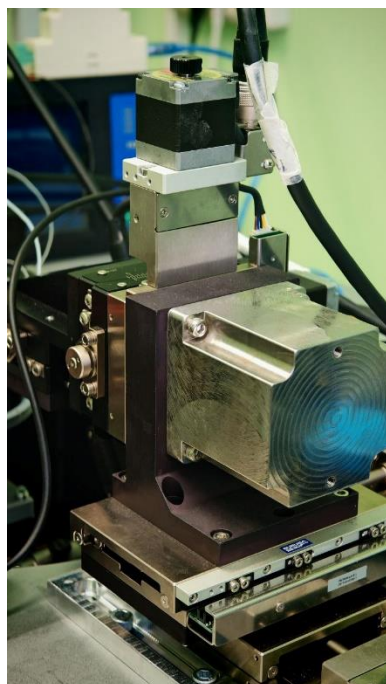


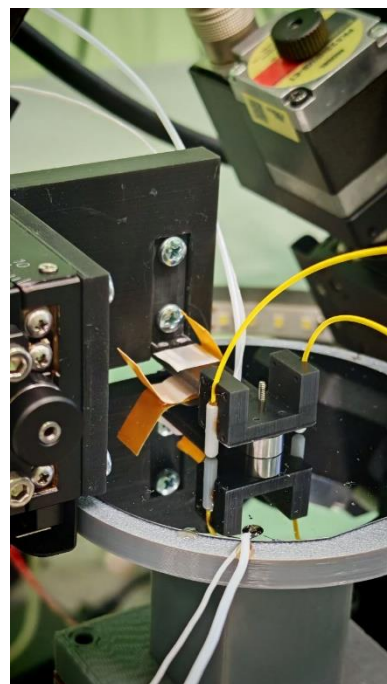
Рис. 1.



a)



б)



в)

Рис. 2.

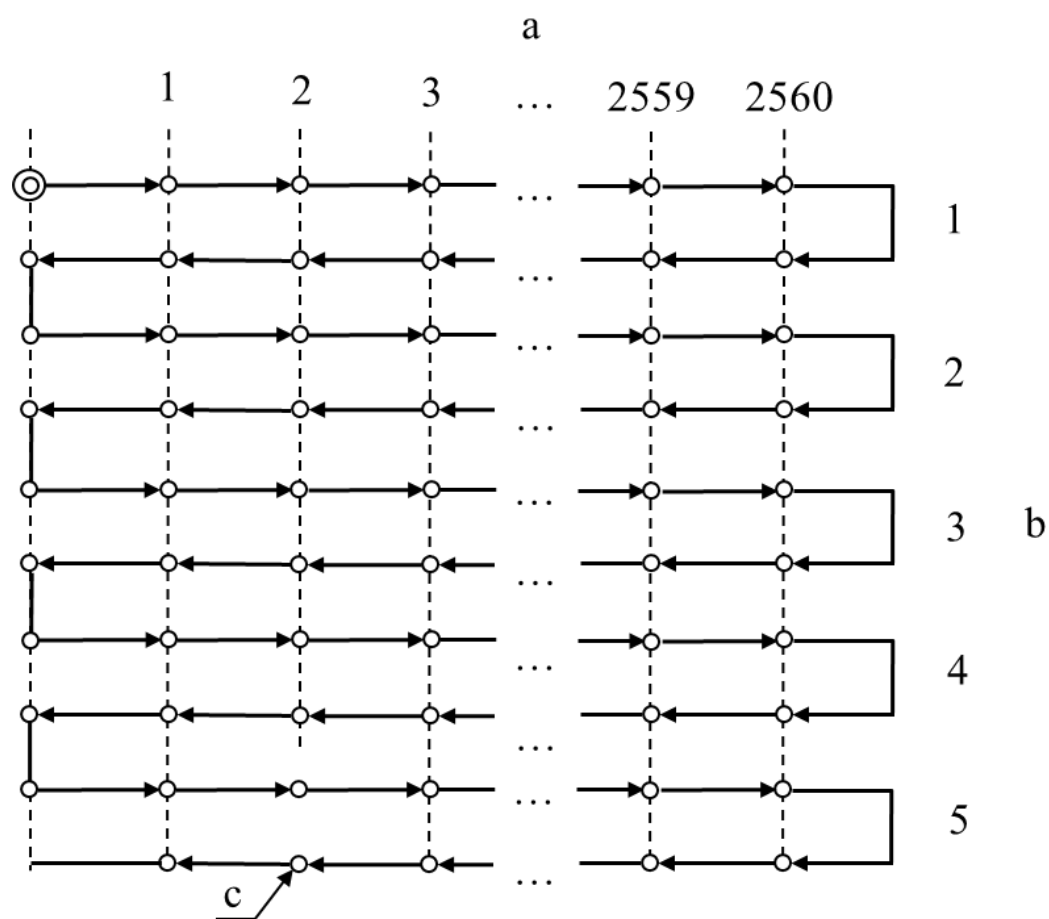


Рис. 3.

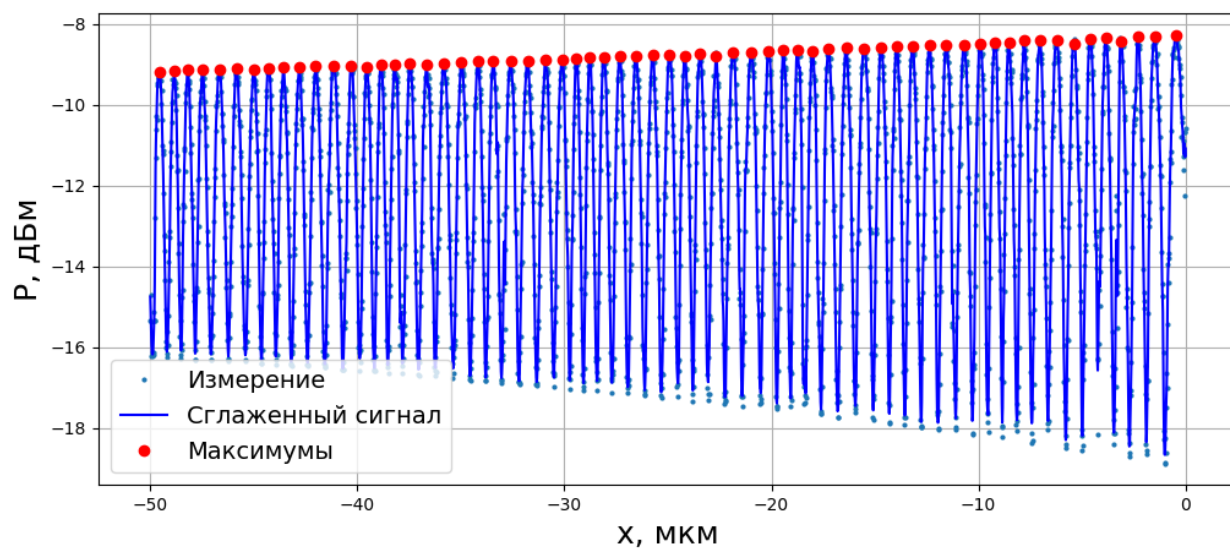
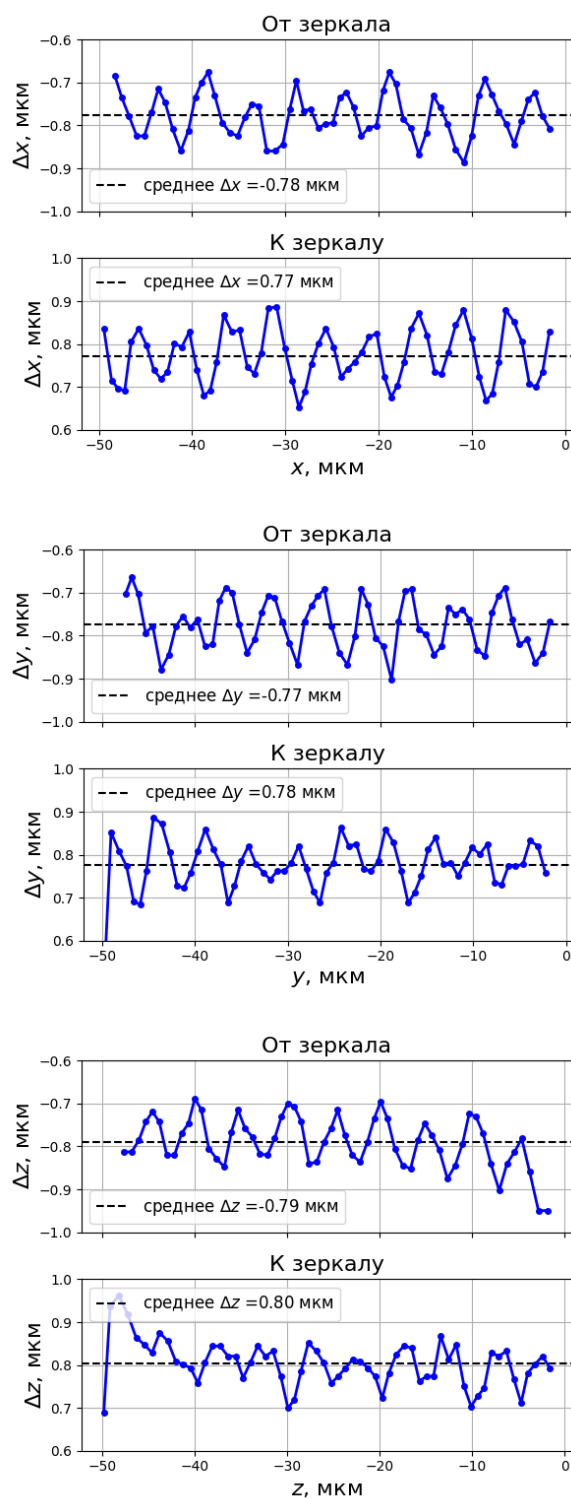
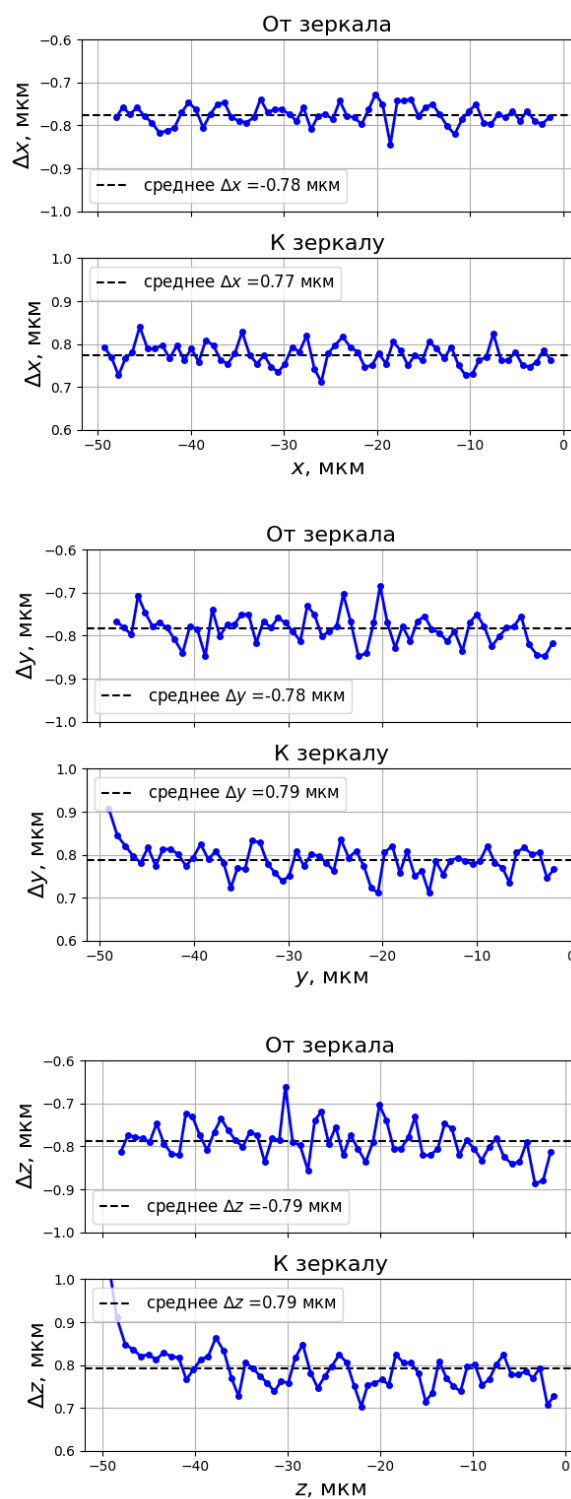


Рис. 4.



а)



б)

Рис. 5.