



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G02B 1/12 (2025.08)

(21)(22) Заявка: 2024139863, 26.12.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.12.2024

Дата регистрации:
30.01.2026

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 26.12.2024

(45) Опубликовано: 30.01.2026 Бюл. № 4

Адрес для переписки:

105005, Москва, вн.тер.г. Муниципальный
округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, 5, стр.
1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Амелина Ксения
Евгеньевна

(72) Автор(ы):

Тарабрин Михаил Константинович (RU),
Тесленко Андрей Александрович (RU),
Бушунов Андрей Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
технический университет имени Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

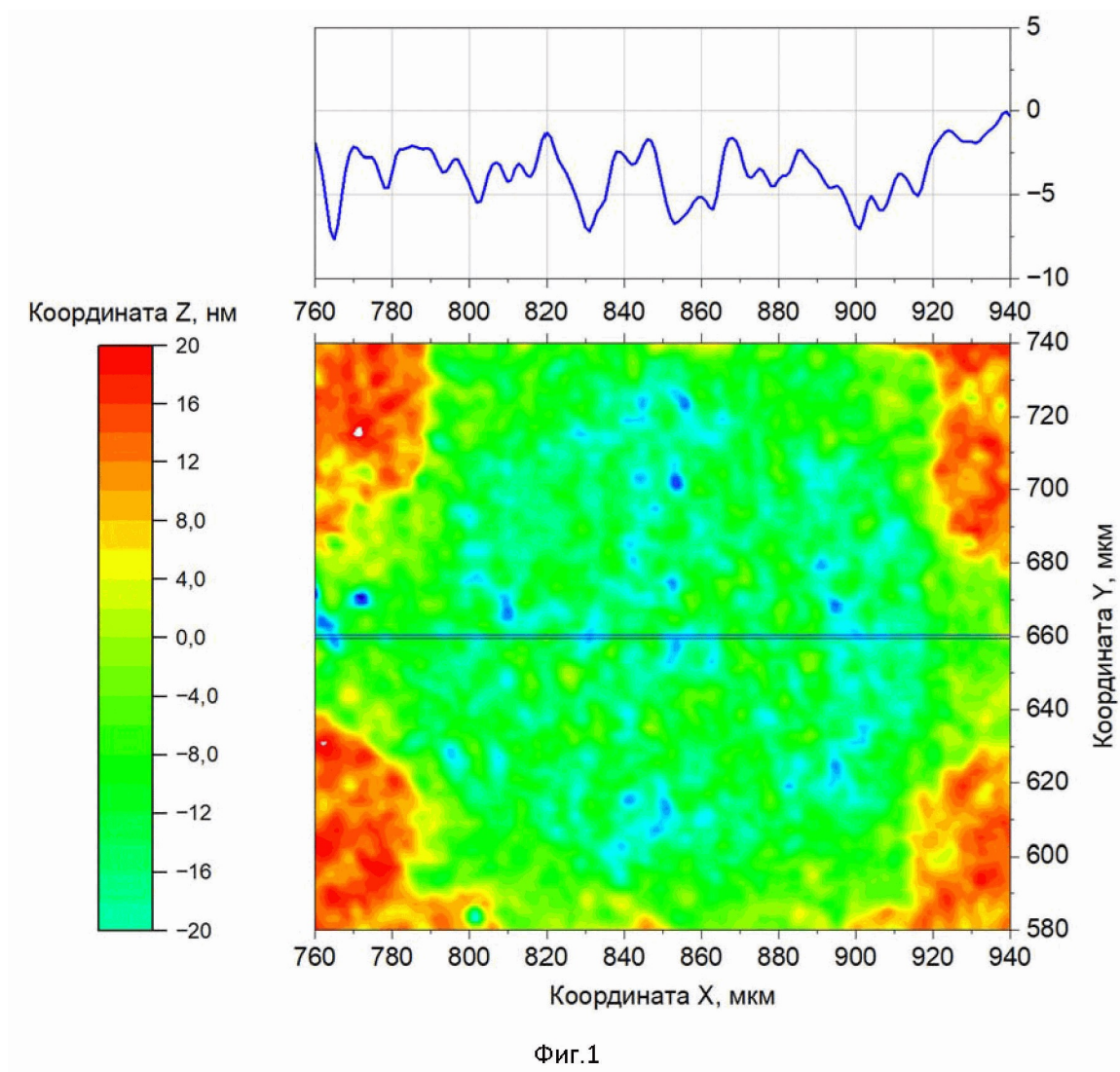
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 11471980 B2, 18.10.2022. US
10712669 B2, 14.07.2020. RU 2797105 C2,
31.05.2023. RU 2806353 C1, 31.10.2023. RU
2465377 C1, 27.10.2012. RU 2347739 C1,
27.02.2009.

(54) Способ фемтосекундного лазерного полирования оптических поверхностей нелинейных оптических
сред

(57) Реферат:

Изобретение относится к способам
фемтосекундного лазерного полирования
оптических поверхностей. Способ включает в
себя размещение оптического образца
относительно точки фокусировки сверхкоротких
импульсов лазерного излучения, где поверхность
нелинейной оптической среды подвергается
воздействию сверхкоротких импульсов лазерного
излучения, причем сверхкороткие импульсы
лазерного излучения воздействуют на
поверхность для удаления материала с
поверхности путем абляции. Для реализации
способа используется двухступенчатый процесс,

включающий грубое полирование и тонкое
полирование. Это позволяет удалить как крупные
царапины и дефекты, так и более мелкие дефекты.
Разработанный способ также включает
использование алгоритмов сканирования,
предотвращающих появление периодичности
следов обработки на поверхности. Технический
результат - получение шероховатости
поверхности нанометрового уровня и избежание
негативного воздействия процесса полирования
на лучевую стойкость оптической поверхности.
2 ил.





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G02B 1/12 (2025.08)

(21)(22) Application: **2024139863, 26.12.2024**

(24) Effective date for property rights:
26.12.2024

Registration date:
30.01.2026

Priority:

(22) Date of filing: **26.12.2024**

(45) Date of publication: **30.01.2026** Bull. № 4

Mail address:

**105005, Moskva, vn.ter.g. Munitsipalnyj okrug
Basmannyj, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1, MGTU
im. N.E. Baumana, Amelina Kseniya Evgenevna**

(72) Inventor(s):

**Tarabrin Mikhail Konstantinovich (RU),
Teslenko Andrei Aleksandrovich (RU),
Bushunov Andrei Alekseevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniia «Moskovskii gosudarstvennyi
tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana
(natsionalnyi issledovatel'skii universitet)»
(MGTU im. N.E. Baumana) (RU)**

(54) **METHOD OF FEMTOSECOND LASER POLISHING OF OPTICAL SURFACES OF NONLINEAR OPTICAL MEDIA**

(57) Abstract:

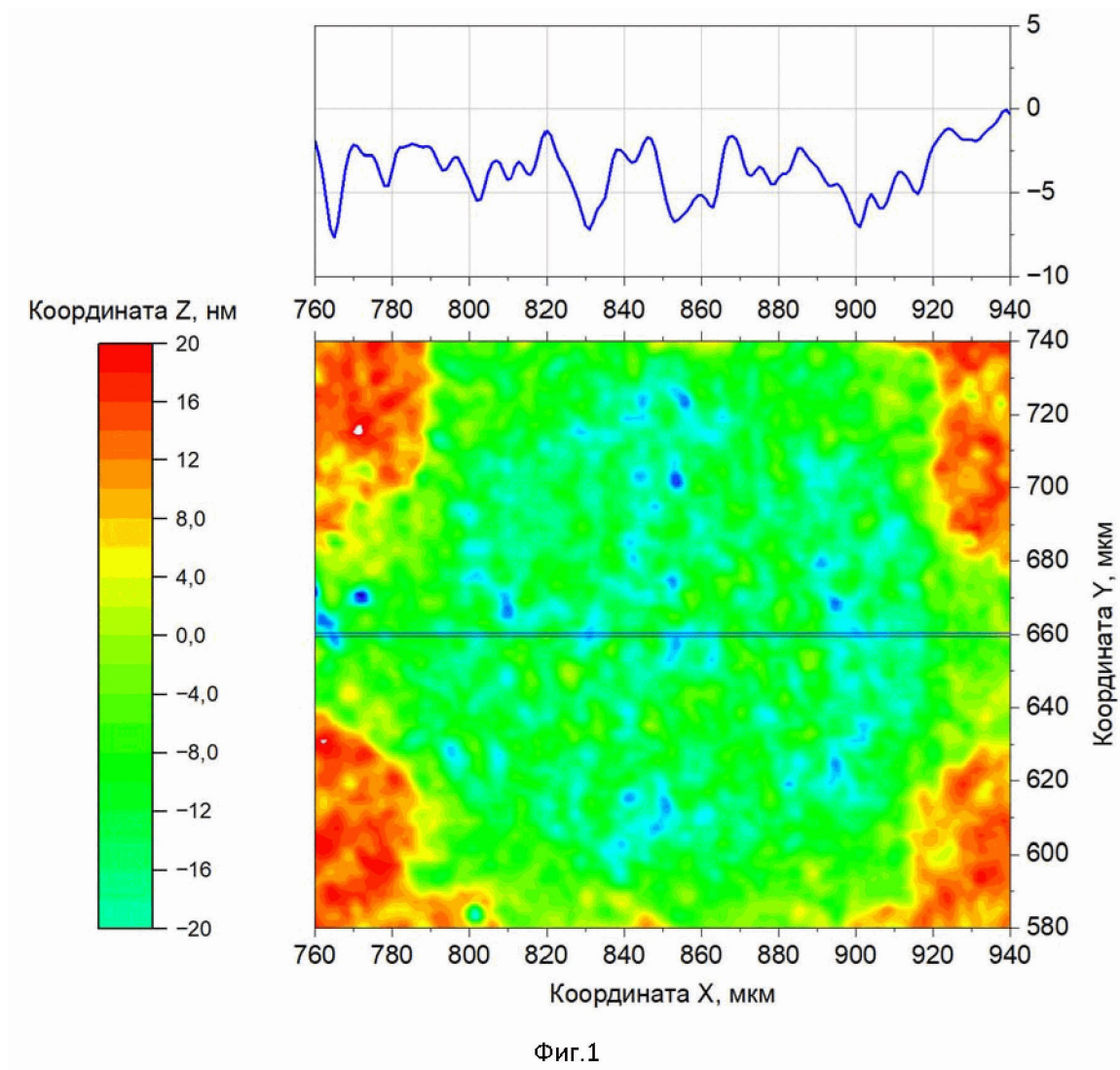
FIELD: laser processing.

SUBSTANCE: invention relates to methods of femtosecond laser polishing of optical surfaces. The method includes placing an optical sample relative to the focusing point of ultrashort pulses of laser radiation, where the surface of the nonlinear optical medium is exposed to ultrashort pulses of laser radiation, wherein the ultrashort pulses of laser radiation act on the surface to remove material from the surface by ablation. To implement the method, a two-stage process is used, including coarse polishing and fine polishing. This

allows removing both large scratches and defects, as well as smaller defects. The developed method also includes the use of scanning algorithms that prevent the appearance of periodicity of processing traces on the surface.

EFFECT: obtaining surface roughness at the nanometre level and avoiding the negative impact of the polishing process on the radiation resistance of the optical surface.

1 cl, 2 dwg



Область техники

Изобретение относится к способам фемтосекундного лазерного полирования оптических поверхностей и предназначено для бесконтактной обработки нелинейных оптических сред BGSe (BaGa₄Se₇) и ZGP (ZnGeP₂), широко применяемых в оптических устройствах среднего инфракрасного (ИК) диапазона. Фемтосекундное лазерное полирование представляет собой перспективное решение для создания оптических компонентов высокого качества, отвечающих современным требованиям в области оптических параметрических генераторов.

Уровень техники

Известно большое количество технологий полирования оптических поверхностей, в том числе поверхностей нелинейных кристаллов, используемых в системах для параметрической генерации: полирование методом свободного абразива, алмазное точение, ионное полирование, полирование непрерывным лазерным излучением и др.

Однако сравнение с фемтосекундным лазерным полированием показывает, что существующие технологии обладают рядом недостатков. Так, контактные методы полирования, хоть и позволяют получать поверхности с нанометровыми шероховатостями, создают под поверхностью трещиноватый слой, который негативно влияет на лучевую стойкость. Высокая лучевая стойкость является принципиальным требованием к нелинейным оптическим средам при использовании в высокомоощных системах среднего ИК-диапазона. Бесконтактные же методы либо не позволяют получить нанометровую шероховатость с достаточно большой скоростью, либо не позволяют устранить подповерхностный трещиноватый слой из-за остаточных термических напряжений.

Наиболее близким аналогом предлагаемого способа является технология удаления материала с помощью ультракоротких лазерных импульсов, описанная в патенте США № US 11,471,980 B2.

Описанная технология предназначена для обработки широкого спектра оптических материалов, однако нелинейные оптические среды, используемые для параметрической генерации излучения – BGSe (BaGa₄Se₇) и ZGP (ZnGeP₂) отличаются от обыкновенных оптических сред, поскольку могут изменять свои структурные и материальные свойства под воздействием высокоинтенсивного излучения. Скорости сканирования, описанные в патенте США, не подходят для обработки нелинейных оптических материалов, поскольку вибрационные эффекты при перемещении образца приводят к формированию нежелательных периодических структур в объёме и на поверхности. Описанная в патенте США технология состоит из одного этапа и не применяется для удаления одновременно микроразмерных (более 500 нм) и наноразмерных (от 10 до 20 нм) дефектов. Описанные в патенте США алгоритмы сканирования позволяют скомпенсировать появление нежелательных периодических следов на поверхности, однако сохранение ориентации сканирования может приводить к нежелательной поляризации или дифракции падающего излучения.

Раскрытие изобретения

Технический результат, на достижение которого направлен предлагаемый способ, заключается в том, что он обеспечивает получение шероховатости нанометрового уровня для поверхностей нелинейных оптических сред BGSe (BaGa₄Se₇) и ZGP (ZnGeP₂), а также позволяет избежать негативного воздействия процесса полирования на лучевую стойкость оптических поверхностей. Это достигается за счёт бесконтактного характера обработки оптической поверхности, что исключает образование подповерхностного трещиноватого слоя, вызванного механическими напряжениями.

Использование лазерного излучения в виде последовательности импульсов фемтосекундной длительности позволяет также минимизировать термическое воздействие на поверхность обрабатываемого материала, что исключает образование трещиноватого слоя за счёт остаточных термических напряжений. Толщина трещиноватого слоя, согласно исследованиям, напрямую влияет на порог лазерного повреждения, поэтому отсутствие трещиноватого слоя позволит избежать негативного воздействия на лучевую стойкость.

Способ фемтосекундного лазерного полирования оптических поверхностей нелинейных оптических сред BGSe (BaGa₄Se₇) и ZGP (ZnGeP₂) включает размещение обрабатываемого оптического образца относительно точки фокусировки сверхкоротких импульсов лазерного излучения, где поверхность нелинейной оптической среды подвергается воздействию сверхкоротких импульсов лазерного излучения, причем сверхкороткие импульсы лазерного излучения воздействуют на поверхность для удаления материала с поверхности путем абляции.

Технология использует двухступенчатый процесс, включающий грубое полирование и тонкое полирование. Способ использует двухступенчатый процесс сканирования фемтосекундным лазерным излучением на длине волны 1026 нм и с длительностью импульсов 200 фс. На первом этапе лазерным пятном диаметром от 10 до 15 мкм, со скоростью 5 мм/с, частотой следования импульсов 100 кГц, энергией импульса от 30 до 50 мкДж, с числом импульсов в пачке от 20 до 30, с числом проходов 30. На втором этапе диаметр лазерного пятна составляет от 2 до 3 мкм, скорость от 3 до 5 мм/с, частота следования импульсов 200 кГц, энергия импульса 2 мкДж, с числом импульсов в пачке 10, число проходов от 10 до 15.

Использование данной технологии позволяет удалять поверхностный слой материала толщиной до 500 нм с шероховатостью не более 5 нм. При этом применение алгоритма перемещения лазерного пятна по поверхности с упорядоченным построчным сканированием и поворотом системы координат сканирования обеспечивает устранение периодичности следов обработки.

Перечень фигур

Фиг.1 – отображение цветного кодирования карты высот поверхности оптического окна из материала ZGP (ZnGeP₂) после предлагаемого фемтосекундного лазерного полирования с дополнительным графиком профиля поперечного сечения поверхности.

Фиг.2 – отображение цветного кодирования карты высот поверхности оптического окна из материала BGSe (BaGa₄Se₇) после предлагаемого фемтосекундного лазерного полирования с дополнительным графиком профиля поперечного сечения поверхности.

Осуществление изобретения

Двухэтапная обработка включает в себя удаление крупных дефектов – таких, как царапины, микроскопические сколы и т.п. – на первом этапе, и удаление более мелких дефектов – таких, как наноразмерные неровности и микроскопические частицы – на втором.

При сканировании используется оригинальный алгоритм сканирования для предотвращения появления остаточных следов и контроля равномерности снятия слоя материала. Алгоритм включает в себя поворот системы координат на заданный угол при каждом проходе, а также смещение фокальной плоскости (или образца) вдоль направления распространения излучения между проходами. Одним проходом считается полный цикл сканирования, при котором система координат поворачивается на 180 градусов. Угол поворота системы координат внутри каждого прохода высчитывается автоматически исходя из количества поворотов. Оптимальными являются 3, 5, 6 и 9

поворотов системы координат. Таким образом, при сканировании с 6 поворотами будет осуществлено 6 операций сканирования – это означает завершение одного прохода. Между проходами также дополнительно может производиться смещение фокальной плоскости (или образца) вдоль направления распространения излучения для увеличения толщины снимаемого слоя без изменения глубины резко изображаемого пространства объектива.

На первом этапе производится сканирование лазерным пятном диаметром от 10 до 15 мкм, со скоростью 5 мм/с, частотой следования импульсов 100 кГц, энергией импульса от 30 до 50 мкДж, с числом импульсов в пачке от 20 до 30, с числом проходов 30. Данная операция необходима для удаления крупных дефектов.

На втором этапе производится операция сканирования лазерным пятном диаметром от 2 до 3 мкм, со скоростью от 3 до 5 мм/с, частотой следования импульсов 200 кГц, энергией импульса 2 мкДж, числом импульсов в пачке 10, числом проходов от 10 до 15. Это позволяет без снижения скорости сканирования с высокой точностью удалить более мелкие дефекты и получить итоговую шероховатость поверхности менее 5 нанометров.

На фиг.1 представлена область, обработанная предлагаемым способом на поверхности кристалла из ZGP (ZnGeP_2), со следующим набором параметров обработки. На первом этапе: длина волны излучения 1026 нм, длительность импульса 200 фс, диаметр пятна 10 мкм, скорость 5 мм/с, частота следования импульсов 100 кГц, энергия импульса 30 мкДж, число импульсов в пачке 20, число проходов 30. На втором этапе: длина волны излучения 1026 нм, длительность импульса 200 фс, диаметр пятна 2 мкм, скорость 5 мм/с, частота следования импульсов 200 кГц, энергия импульса 2 мкДж, число импульсов в пачке 10, число проходов 10. Согласно фиг.1, толщина снятого слоя составляет порядка 40 нм, при этом шероховатость полученной поверхности Ra составляет менее 5 нм.

На фиг.2 представлена область, обработанная предлагаемым способом на поверхности кристалла из BGSe (BaGa_4Se_7), со следующим набором параметров. На первом этапе: длина волны излучения 1026 нм, длительность импульса 200 фс, диаметр пятна 15 мкм, скорость 5 мм/с, частота следования импульсов 100 кГц, энергия импульса 50 мкДж, число импульсов в пачке 30, число проходов 30. На втором этапе: длина волны излучения 1026 нм, длительность импульса 200 фс, диаметр пятна 3 мкм, скорость 3 мм/с, частота следования импульсов 200 кГц, энергия импульса 2 мкДж, число импульсов в пачке 10, число проходов 15. Согласно фиг.2, толщина снятого слоя составляет порядка 30 нм, при этом шероховатость полученной поверхности Ra составляет менее 2 нм.

В дополнение можно использовать систему обдува для удаления осадков абляционного материала с поверхности и возможно для финишного удаления продуктов абляции ультразвуковую очистку в дистиллированной или деионизированной воде с частотой ультразвука от 20 до 100 кГц. Это позволяет с большей эффективностью удалить осаждённый на поверхности абляционный материал.

(57) Формула изобретения

Способ фемтосекундного лазерного полирования оптических поверхностей нелинейных оптических сред BGSe (BaGa_4Se_7) и ZGP (ZnGeP_2), включающий: размещение обрабатываемого оптического образца относительно точки фокусировки сверхкоротких импульсов лазерного излучения, где поверхность нелинейной оптической среды подвергается воздействию сверхкоротких импульсов лазерного излучения для удаления

материала с поверхности путем абляции; использование двухступенчатого процесса сканирования фемтосекундным лазерным излучением на длине волны 1026 нм и с длительностью импульсов 200 фс; на первом этапе лазерным пятном с диаметром от 10 до 15 мкм, со скоростью 5 мм/с, частотой следования импульсов 100 кГц, энергией импульса от 30 до 50 мкДж, с числом импульсов в пачке от 20 до 30, с числом проходов 30; на втором этапе лазерным пятном с диаметром от 2 до 3 мкм, скоростью от 3 до 5 мм/с, частотой следования импульсов 200 кГц, энергией импульса 2 мкДж, с числом импульсов в пачке 10, с числом проходов от 10 до 15; при этом перемещение лазерного пятна по поверхности с упорядоченным построчным сканированием и поворотом системы координат сканирования обеспечивает устранение периодичности следов обработки.

15

20

25

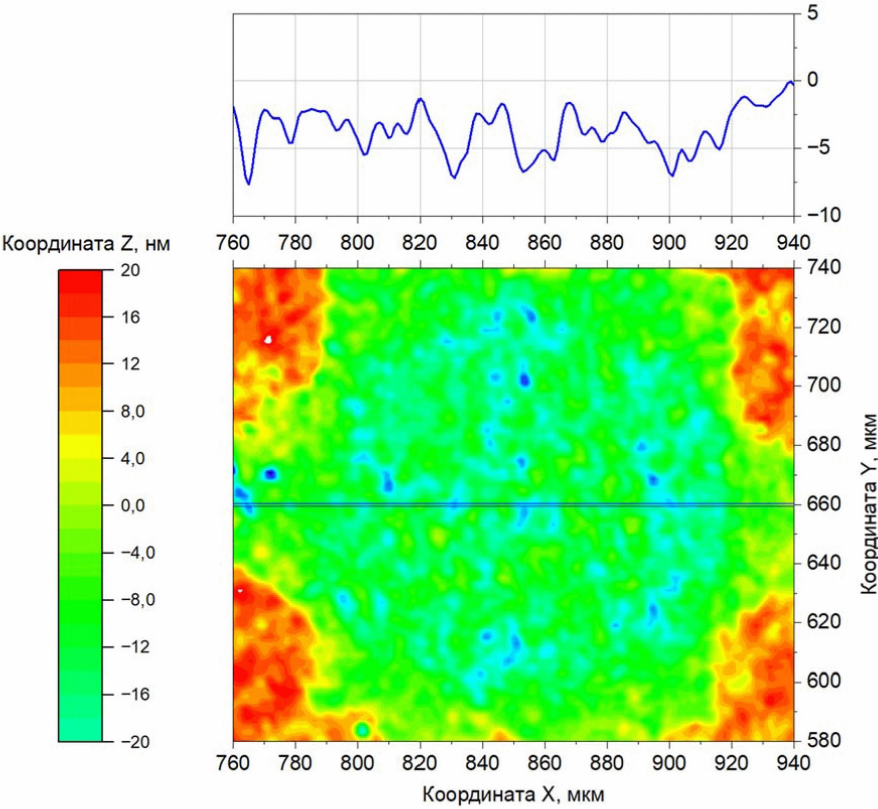
30

35

40

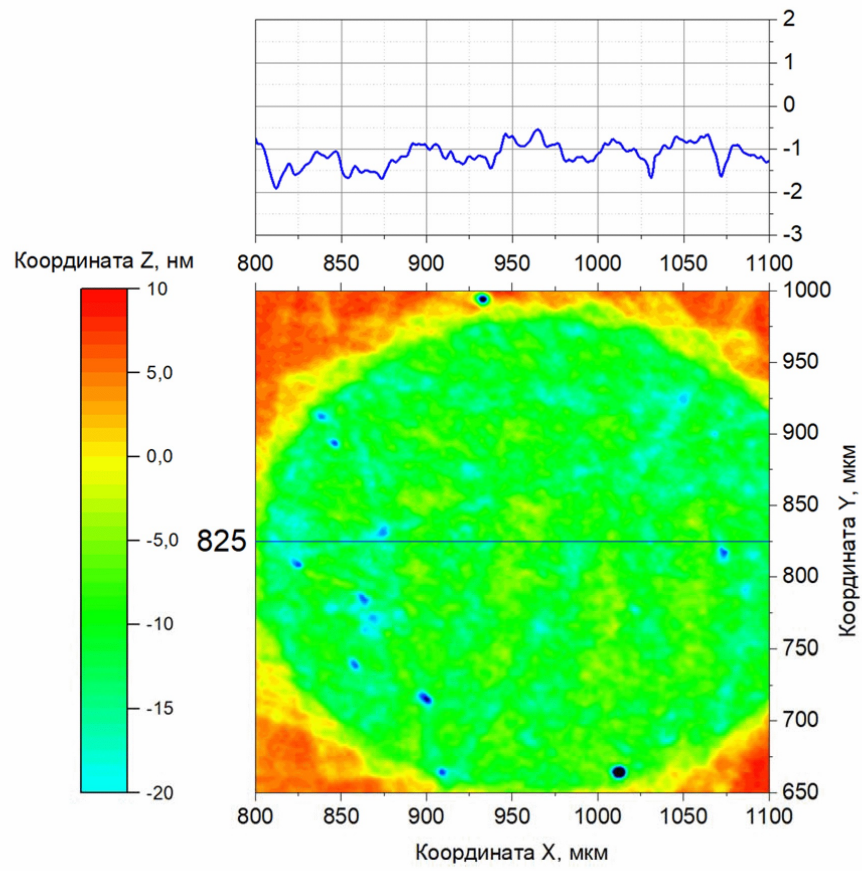
45

1



Фиг.1

2



Фиг.2