



ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ/CONDENSED MATTER PHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95> EDN: VNOCHT

МИКРОРАЗРУШЕНИЯ В ТИТАНАТЕ СТРОНЦИЯ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ НАНОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Научная статья

Яшкевич Е.А.^{1,*}, Серопян Г.М.², Позыгун И.С.³³ ORCID : 0000-0002-2262-264X;¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Российская Федерация^{2,3} Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (eayashkevich[at]mail.ru)

Аннотация

В работе исследуется разрушение монокристалла титаната стронция SrTiO₃ одиночным лазерным импульсом наносекундной длительности. Область лазерного разрушения исследовалась с применением рентгеноструктурного анализа, который дал возможность оценить структурные изменения на макроскопическом уровне и оптической микроскопии, позволившей провести визуальный осмотр и морфометрический анализ дефектов. Пороговое значение плотности мощности лазерного излучения, при которой начинается разрушение титаната стронция, находится в диапазоне $(1,2 \div 2,2) \cdot 10^8$ Вт/см². Эксперименты показывают линейную зависимость пороговой плотности мощности от диаметра лазерного пятна на поверхности образца, что указывает на механизм лазерного разрушения титаната стронция, связанный с «собственной» моделью разрушения прозрачных диэлектриков, а не с дефектами структуры.

Ключевые слова: импульсное лазерное излучение, прозрачный диэлектрик, титанат стронция, пороговая интенсивность излучения, лазерное разрушение.

MICROCRACKS IN STRONTIUM TITANATE INDUCED BY NANOSECOND LASER RADIATION

Research article

Yashkevich E.A.^{1,*}, Seropyan G.M.², Pozygun I.S.³³ ORCID : 0000-0002-2262-264X;¹ Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint-Petersburg, Russian Federation^{2,3} Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

* Corresponding author (eayashkevich[at]mail.ru)

Abstract

The work studies the destruction of a strontium titanate (SrTiO₃) single crystal by a single nanosecond laser pulse. The laser damage zone was examined using X-ray structural analysis, which enabled the evaluation of structural changes at the macroscopic level, and optical microscopy, which allowed for visual inspection and morphometric analysis of the defects. The threshold power density of the laser radiation at which the destruction of strontium titanate begins lies in the range $(1.2-2.2) \times 10^8$ W/cm². The experiments demonstrate a linear dependence of the threshold power density on the diameter of the laser spot on the sample surface, indicating a mechanism of laser destruction of strontium titanate associated with the "intrinsic" model of destruction of transparent dielectrics, rather than with structural defects.

Keywords: pulsed laser radiation, transparent dielectric, strontium titanate, threshold intensity of radiation, laser destruction.

Введение

Титанат стронция является нелинейным диэлектрическим, используется в качестве подложек для выращивания тонких сверхпроводящих пленок и сегнетоэлектриков. Использование прозрачных монокристаллов для изготовления оптических элементов делает актуальными исследования физических процессов, происходящих при оптическом разрушении прозрачных диэлектриков [1], [2], [3]. Кроме того, актуальны исследования лазерной абляции прозрачных диэлектриков и определение пороговых интенсивностей лазерного излучения с длиной волны, попадающей в область прозрачности таких материалов [4].

Механизмы разрушения прозрачных диэлектриков могут зависеть от плотности мощности и длины волны лазерного излучения, длительности импульса и частоты следования импульсов, структуры облучаемого материала, качества обработки поверхности образца, наличия и концентрации примесей в облучаемом материале [5], [6]. Понимание механизмов лазерного разрушения важно для решения задач создания мощных лазеров, так как разрушение является ограничивающим фактором для достижения высоких интенсивностей лазерного излучения [7].

Выделяют две модели разрушения прозрачных диэлектриков — собственный и несобственный. В первом случае разрушение инициируется в самой матрице и не связано с наличием в материале дефектов. Другой механизм лазерного разрушения — несобственный, обусловленный инородными включениями, примесями и дефектами в материале.

В прозрачных диэлектриках основными считают следующие механизмы разрушения: тепловые; фононные; связанные с влиянием несовершенств кристаллической решетки; связанные с неоднородностью лазерного поля, обусловленные самофокусировкой; влияние электронной лавины и многофотонного поглощения света [8].

Длительность импульса играет ключевую роль в термических моделях взаимодействия лазерного излучения с материалами. При длительности импульса порядка 1 мс происходит нагрев, кипение и испарение материала. При длительности импульса порядка 1 нс происходит абляция материала в основном за счет испарения [9].

Постановка задачи и описание эксперимента

Основной задачей в данной работе является экспериментальное определение порогового значения интенсивности лазерного излучения, при котором разрушается монокристалл титаната стронция.

В работе применялся твердотельный наносекундный лазер с Nd: YAG стержнем. Длина волны излучения составляла 1064 нм, длительность импульса 16 нс. Образцы облучались с разной интенсивностью лазерного излучения. На рис. 1 показана схема установки для облучения образцов. Изменение интенсивности лазерного излучения проводилось расфокусировкой лазерного излучения с помощью линзы, меняя таким образом площадь лазерного пятна.

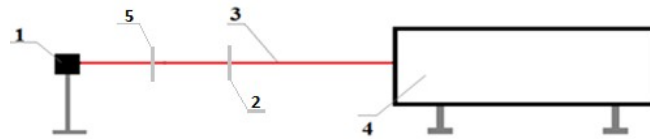


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки для облучения образцов:

1 – образец; 2 – диафрагма; 3 – лазерный луч; 4 – лазер; 5 – линза

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.1>

Основные результаты

При плотности мощности лазерного излучения $2,9 \cdot 10^{10}$ Вт/см² наблюдается лазерное разрушение титаната стронция с одновременным образованием расплава материала в зоне облучения, как показано на микрофотографии поверхности образца (см. рис. 2).

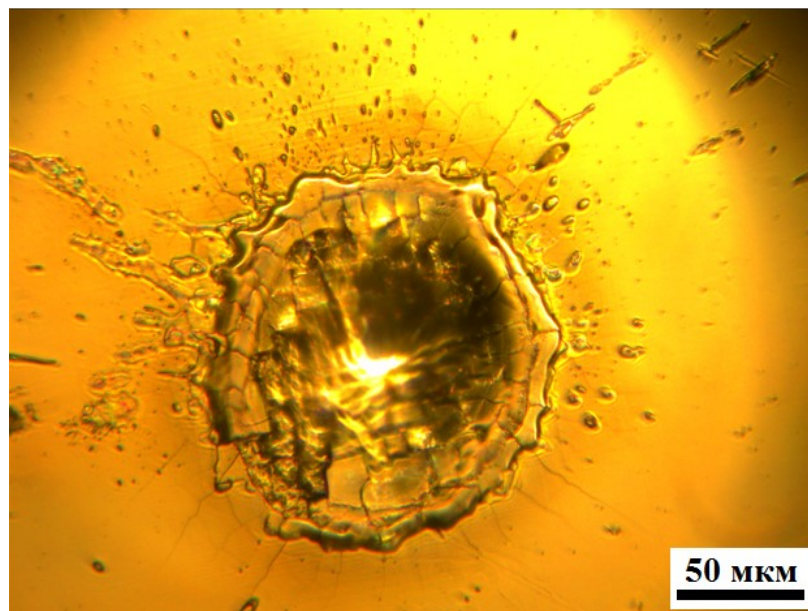


Рисунок 2 - Микрофотография области разрушения после облучения лазерным излучением с плотностью мощности $2,9 \cdot 10^{10}$ Вт/см²

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.2>

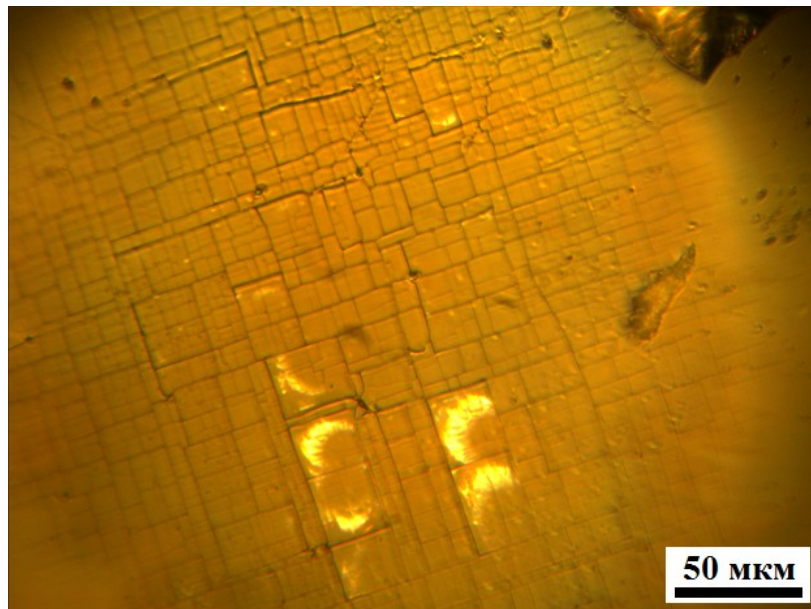


Рисунок 3 - Микрофотография области разрушения после облучения лазерным излучением с плотностью мощности $1,0 \cdot 10^9$ Вт/см²

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.3>

На микрофотографиях, представленных на рис. 3 и 4, изображена поверхность образца после облучения лазерным импульсом с плотностью мощности $1,0 \cdot 10^9$ Вт/см² и $9,2 \cdot 10^8$ Вт/см² соответственно. В указанных режимах признаков лазерной абляции или плавления материала не обнаружено; вместо этого формируется сеть микротрещин. Центральную часть облученной зоны характеризуют яркие интерференционные пятна, вероятно, свидетельствующие о продольном расслоении материала. Согласно проведенному анализу, размер дефектов уменьшается от центра к периферии, что, по-видимому, обусловлено неравномерным профилем интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка.

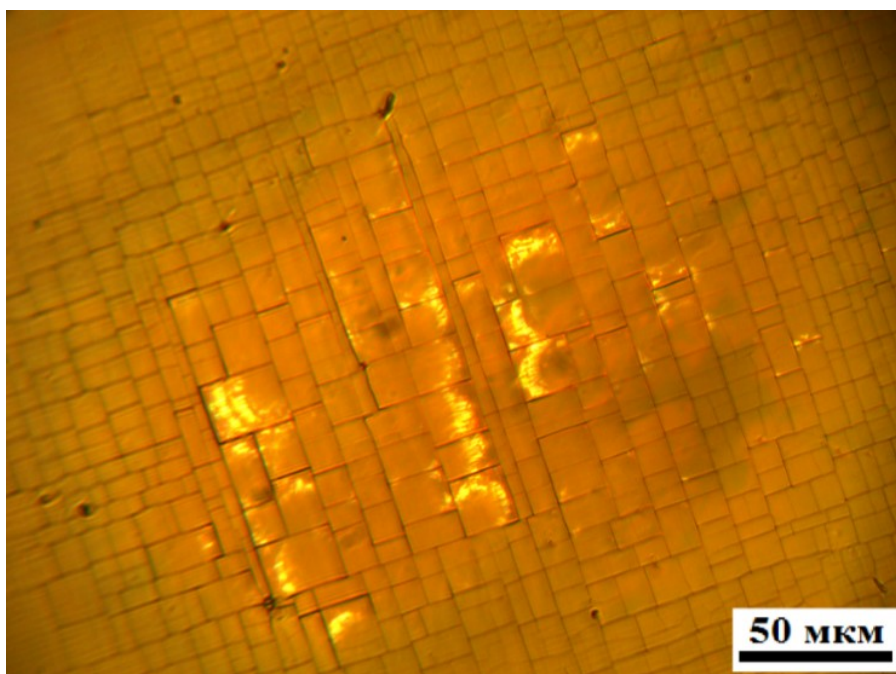


Рисунок 4 - Микрофотография области разрушения после облучения лазерным излучением с плотностью мощности $9,2 \cdot 10^8$ Вт/см²

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.4>

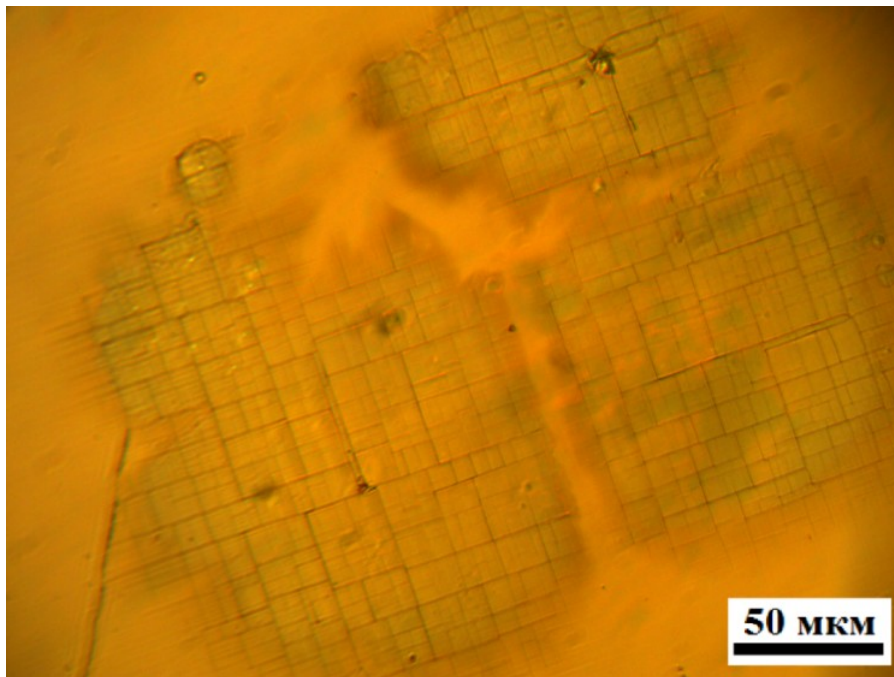


Рисунок 5 - Микрофотография области разрушения после облучения лазерным излучением с плотностью мощности $2,2 \cdot 10^8$ Вт/см²
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.5>

Микрофотография на рис. 5 соответствует плотности мощности облучения $2,2 \cdot 10^8$ Вт/см². При таком уровне воздействия область повреждений на поверхности фрагментируется. Данный эффект может объясняться многомодовой структурой излучения используемого лазера.

При плотности мощности лазерного излучения ниже значения $1,2 \cdot 10^8$ Вт/см² в зоне облучения уже не наблюдаются видимые разрушения. Отсюда следует, что пороговая плотность мощности лазерного разрушения титаната стронция лежит в диапазоне $(1,2 \div 2,2) \cdot 10^8$ Вт/см².

Дальнейшие исследования лазерного разрушения титаната стронция проводились с помощью рентгеноструктурного анализа образцов с целью выяснения критических напряжений в материале при плотности мощности ниже критической. Монокристаллическая пластина титаната стронция облучалась по всей площади лазерным излучением с плотностью мощности $5,3 \cdot 10^7$ Вт/см². Для этого образец располагался на двухкоординатном столике с компьютерным управлением.

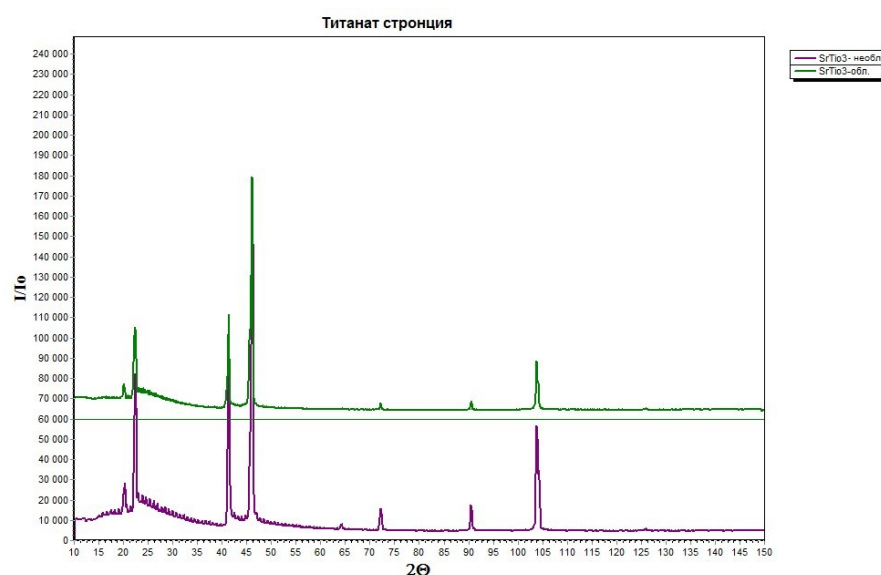


Рисунок 6 - Совмещенные рентгенограммы облученного и необлученного образцов титаната стронция
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.6>

Для определения критических напряжений снимались рентгенограммы необлученной и облученной подложек титаната стронция, а также брались параметры титаната стронция из карточки с рентгенограммой идеального образца.

Сравнение рентгенограмм облученного и необлученного образца показывает, что сдвига пиков на рентгенограмме не наблюдается (рис. 6), что говорит о том, что облучение образца данной интенсивностью не приводит к росту напряжений в материале. Следовательно, можно сделать вывод о том, что критические напряжения, при которых происходят существенные деформации кристалла титаната стронция, могут лежать в диапазоне плотности мощности $(0,5 \div 1,2) \cdot 10^8$ Вт/см².

Проведенный анализ изображений области облучения позволил установить, что лазерное воздействие на образцы титаната стронция излучением с длиной волны 1064 нм индуцирует образование зон микроразрушения, морфология которых характеризуется наличием структур как с мелкодисперсной, так и с крупноячейстой топографией (см. рис. 7).

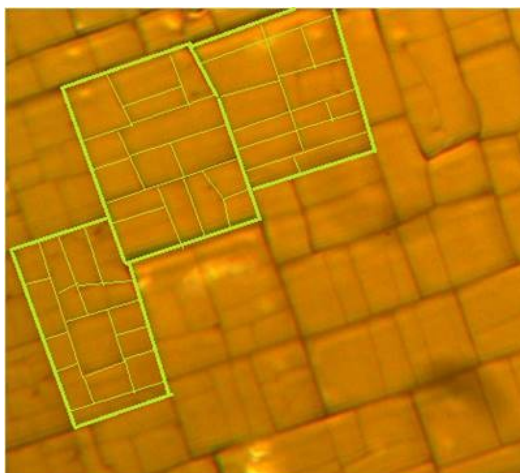


Рисунок 7 - Микроразрушения при длине волны лазерного излучения 1064 нм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.7>

Аналогичная картина структурных изменений наблюдается при облучении мишени излучением с длиной волны 532 нм, что демонстрирует сопоставимый механизм повреждения материала (см. рис. 8).

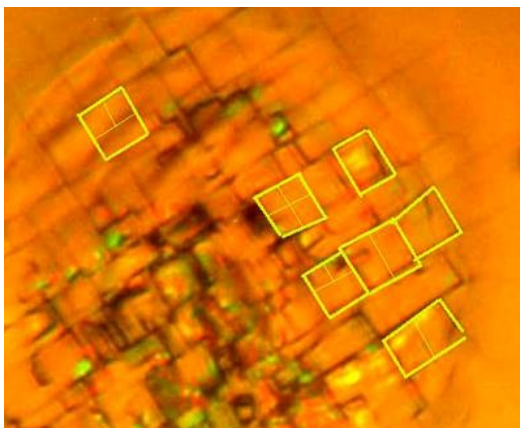


Рисунок 8 - Микроразрушения при длине волны лазерного излучения 532 нм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.8>

Рассчитанные значения усредненных площадей мелких ячеек S_1 практически не различаются для длин волн лазерного излучения 1064 и 532 нм, а средние площади S_2 крупных ячеек существенно отличаются. Природа различия размеров крупных ячеек для разных длин волн лазерного излучения пока не понятна и требует дальнейших исследований. Результаты статистической обработки изображений микроразрушений приведены ниже (см. табл. 1).

Таблица 1 - Результаты статистической обработки изображений микроразрушений кристалла титаната стронция

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.9>

Средняя площадь ячеек	Длина волны лазерного излучения 1064 нм	Длина волны лазерного излучения 532 нм
S_1 , мкм ²	65	64
S_2 , мкм ²	325	179

Эксперименты позволили выявить зависимость пороговой плотности мощности I_n лазерного излучения, при которой происходит разрушение титаната стронция, от диаметра лазерного пятна d , сфокусированного на поверхности образца. Зависимость представлена на рис. 9.

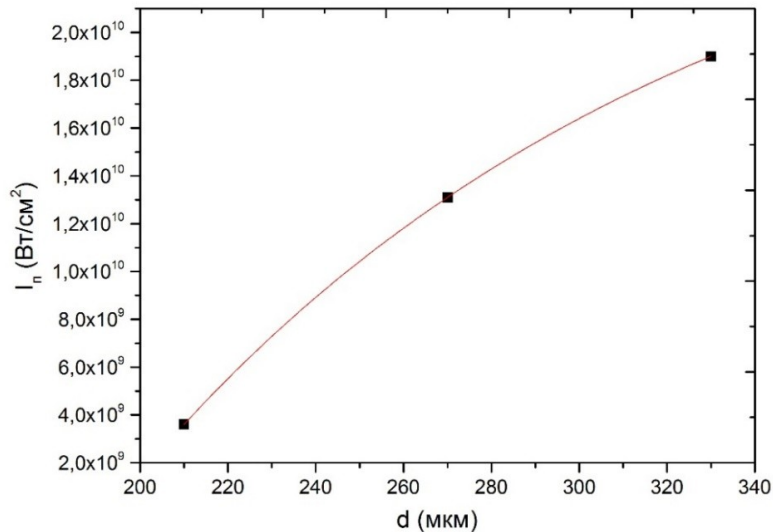


Рисунок 9 - Зависимость пороговой плотности мощности I_n лазерного излучения от диаметра лазерного пятна d
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.10>

Зависимость пороговой плотности мощности лазерного излучения от диаметра лазерного пятна d наблюдалась и авторами работы [10]. На рис. 10 приведена зависимость пороговой плотности энергии от диаметра облучаемой области поверхности стекла Ф-8 из указанной работы. Столь сильную зависимость нельзя объяснить с точки зрения механизма лавинной ионизации. В то же время она хорошо описывается с помощью модели твёрдого прозрачного диэлектрика, содержащего поглощающие включения.

При фокусировке лазерного излучения на поверхность твердых прозрачных диэлектриков может наблюдаться размерный эффект, связанный с зависимостью порога оптического пробоя от размера зоны облучения. Прочность оптических материалов определяется пороговой интенсивностью, при которой происходят разрушения на поверхность, а не в объеме. Морфология разрушений в области высоких порогов резко отлична от морфологии разрушения в области низких порогов [10].

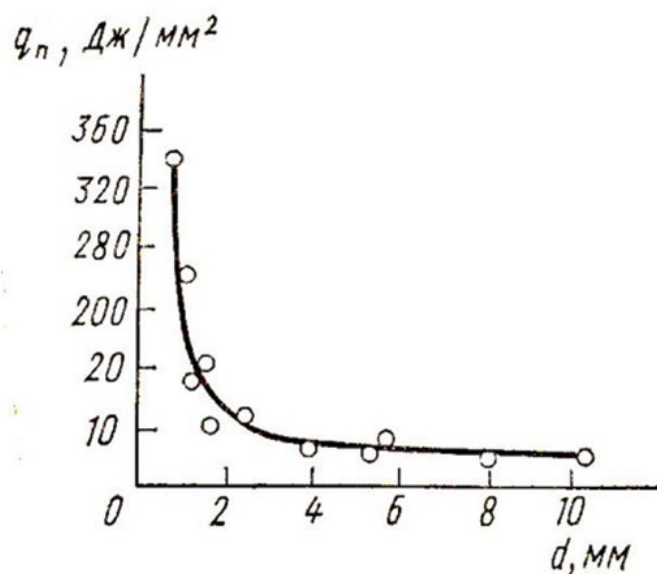


Рисунок 10 - Зависимость пороговой плотности энергии от диаметра облучаемой области поверхности стекла Ф-8
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.95.11>

*Примечание: по ист. [10]*

При малых значениях пороговых интенсивностей пространственные флуктуации лазерной прочности облучаемого материала обусловлены наличием дефектов, которые могут эффективно поглощать лазерное излучение, а порог разрушения должен снижаться с повышением концентрации этих дефектов. При высоких значениях пороговых интенсивностей лазерная прочность материала связана с возникновением электронной лавины.

Отличие наших экспериментальных данных от работы [10], можно объяснить различной вероятностью попадания в область лазерного пятна поглощающих дефектов, инициирующих разрушение. Здесь эта вероятность тем больше, чем больше диаметр пятна, а за этим следует и уменьшение пороговой плотности мощности. Линейная зависимость пороговой плотности мощности лазерного излучения от диаметра лазерного пятна в нашей работе может свидетельствовать о том, что микровключения в нашем образце отсутствуют или имеются в незначительном количестве и, следовательно, лазерное разрушение наносекундным импульсом может определяться механизмом электронной лавины.

Заключение

Эксперименты по одноимпульсному разрушению монокристалла титаната стронция наносекундным лазерным излучением показали, что пороговая плотность мощности, при которой материал разрушается, находится в диапазоне $(1,2 \div 2,2) \cdot 10^8$ Вт/см². Критические напряжения, при которых происходят существенные деформации кристалла титаната стронция, могут возникать в диапазоне плотности мощности $(0,5 \div 1,2) \cdot 10^8$ Вт/см². Обнаруженная линейная зависимость пороговой плотности мощности лазерного излучения от диаметра лазерного пятна свидетельствует о том, что механизм лазерного разрушения титаната стронция не связан с дефектами структуры.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Lee D. Laser-induced phase transformation in SrTiO₃ / D. Lee, J. Jeong, S. Ahn // Nature Materials. — 2018. — № 17. — P. 148–152. — DOI: 10.1038/s41563-017-0008-0
2. Zhang J. Anisotropic optical response of SrTiO₃ under femtosecond laser irradiation / J. Zhang, C. Wang, Y. Yang et al. // Physical Review B. — 2020. — № 102. — P. 214105. — DOI: 10.1103/PhysRevB.102.214105
3. Chen F. Micromachining of optical waveguides in SrTiO₃ by femtosecond laser pulses / F. Chen, X. Wang, J. Zhang et al. // Optics Express. — 2021. — № 29. — P. 5698–5710. — DOI: 10.1364/OE.415152
4. Осипов В.В. Процессы взаимодействия лазерного излучения с пористыми прозрачными материалами при их абляции // Квантовая электроника. / В.В. Осипов, В.В. Лисенков, В.В. Платонов и др. // Квантовая электроника. — 2018. — № 48. — С. 235–243. — DOI: 10.1070/QEL16628
5. Позыгун И.С. Взаимодействие наносекундного лазерного излучения с поверхностью монокристаллического титаната стронция / И.С. Позыгун, Г.М. Серопян // Журнал технической физики. — 2017. — № 62. — С. 1128–1130. — DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44499.1958
6. Osipov V.V. Interaction of Laser Radiation with Transparent Material Porous Targets / V.V. Osipov, V.V. Lisenkov, V.V. Platonov et al. // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) / Ed. by V.V. Vyushin — IEEE, 2020. — P. 76–82. — DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153466
7. Маненков А.А. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел / А.А. Маненков, А.Ж. Прохоров // Успехи физических наук. — 1986. — № 148. — С. 179–180.
8. Стрекалов В.Н. Механическое разрушение прозрачных диэлектриков сфокусированным лазерным излучением / В.Н. Стрекалов // Письма в Журнал технической физики. — 2000. — № 26. — С. 19–20.
9. Быковский Н.Е. О механизме деформации поверхности кристалла иттрий-алюминиевого граната под действием наносекундного лазерного импульса с широким спектром / Н.Е. Быковский, Е.В. Заведеев, Ю.В. Сенатский // Физика твердого тела. — 2015. — № 57. — С. 807–812.
10. Бахáрев М.С. Структура и прочность материалов при лазерных воздействиях / М.С. Бахáрев, Л.И. Миркин, С.А. Шестериков и др. — Москва: Издательство Московского университета, 1988. — 224 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lee D. Laser-induced phase transformation in SrTiO₃ / D. Lee, J. Jeong, S. Ahn // Nature Materials. — 2018. — № 17. — P. 148–152. — DOI: 10.1038/s41563-017-0008-0
2. Zhang J. Anisotropic optical response of SrTiO₃ under femtosecond laser irradiation / J. Zhang, C. Wang, Y. Yang et al. // Physical Review B. — 2020. — № 102. — P. 214105. — DOI: 10.1103/PhysRevB.102.214105
3. Chen F. Micromachining of optical waveguides in SrTiO₃ by femtosecond laser pulses / F. Chen, X. Wang, J. Zhang et al. // Optics Express. — 2021. — № 29. — P. 5698–5710. — DOI: 10.1364/OE.415152



4. Osipov V.V. Processy' vzaimodejstviya lazernogo izlucheniya s poristy'mi prozrachny'mi materialami pri ix ablyacii // Kvantovaya e'lektronika. [Processes of interaction of laser radiation with porous transparent materials upon ablation] / V.V. Osipov, V.V. Lisenkov, V.V. Platonov et al. // *Quantum Electron.* — 2018. — № 48. — P. 235–243. — DOI: 10.1070/QEL16628 [in Russian]
5. Pozy'gun I.S. Vzaimodejstvie nanosekundnogo lazernogo izlucheniya s poverxnost'yu monokristallicheskogo titanata stronciya [Interaction of nanosecond laser radiation with the surface of a single-crystal strontium titanate] / I.S. Pozy'gun, G.M. Seropyan // *Technical Physics.* — 2017. — № 62. — P. 1128–1130. — DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44499.1958 [in Russian]
6. Osipov V.V. Interaction of Laser Radiation with Transparent Material Porous Targets / V.V. Osipov, V.V. Lisenkov, V.V. Platonov et al. // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) / Ed. by V.V. Vyushin — IEEE, 2020. — P. 76–82. — DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153466
7. Manenkov A.A. Lazernoe razrushenie prozrachny'x tverdy'x tel [Laser damage in transparent solids] / A.A. Manenkov, A.Zh. Proxorov // *Advances in Physical Sciences.* — 1986. — № 148. — P. 179–180. [in Russian]
8. Strekalov V.N. Mexanicheskoe razrushenie prozrachny'x dielektrikov sfokusirovanny'm lazerny'm izlucheniem [Mechanical Fracture of Transparent Dielectrics by Focused Laser Radiation] / V.N. Strekalov // *Technical Physics Journal Letters.* — 2000. — № 26. — P. 19–20. [in Russian]
9. By'kovskij N.E. O mexanizme deformacii poverxnosti kristalla ittrij-alyuminievogo granata pod dejstviem nanosekundnogo lazernogo impul'sa s shirokim spektrom [On the mechanism of the surface deformation of an yttrium aluminum garnet crystal under the action of a nanosecond laser pulse with a broad spectrum] / N.E. By'kovskij, E.V. Zavedeev, Yu.V. Senatskij // *Physics of the Solid State.* — 2015. — № 57. — P. 807–812. [in Russian]
10. Bakhárev M.S. Struktura i prochnost materialov pri lazernikh vozdeistviyakh [Structure and Strength of Materials under Laser Action] / M.S. Bakhárev, L.I. Mirkin, S.A. Shesterikov et al. — Moscow: Moscow University Press, 1988. — 224 p. [in Russian]