Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 538.971

Оригинальная статья

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ЛАЗЕРА

Т.В. Малинский¹, С.И. Миколуцкий¹, В.Е. Рогалин¹, Ю.В. Хомич¹, В.А. Ямщиков¹,
И.А. Каплунов², А.И. Иванова²

¹ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук»
191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18
v-rogalin@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»,
170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33
kaplunov.ia@tversu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.628

Аннотация: Методами оптической профилометрии и сканирующей электронной микроскопии исследовано воздействие излучения наносекундного ультрафиолетового лазера ($\lambda = 355$ нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе – до 8 мДж, частота следования импульсов до 100 Гц) на монокристалл кремния. При плотности энергии $\geq 1,2$ Дж/см² наблюдалось образование плазменного факела и кратера. При плотности энергии $\geq 0,2$ Дж/см², возникают очаги микропробоя на дефектах обработки и зафиксированы следы неконтролируемого поднятия поверхности. Облучение сканирующим пучком лазера при плотности энергии 0,2 Дж/см² образует микрократеры на поверхности размером несколько мкм. С увеличением плотности энергии размер микропробоев увеличивался, и при плотности энергии $\geq 0,7$ Дж/см² воздействие сканирующим лучом образует сплошную зону повреждений.

Ключевые слова: лазерное воздействие, монокристалл кремния, УФ лазер, наносекундный импульс, микро- и наномодификация поверхности, пластическая деформация.

1. Введение

Монокристаллический кремний является основным материалом для изготовления разнообразных изделий электроники и оптики [1, 2]. При создании электронных компонент из кремния часто используется лазерная техника для резки, скрайбирования, термообработки, очистки поверхности и др. Поэтому понимание физико-химических процессов взаимодействия лазерного излучения с кристаллом крайне важно для правильного применения лазеров в технологическом процессе.

Воздействию лазерного излучения на монокристаллы кремния посвящено значительное число экспериментальных и теоретических работ, [3-12]. В области прозрачности кремния воздействие мощного линейно поляризованного лазерного импульса на его поверхность может приводить к появлению упорядоченных структур [10-12], которые возникают в результате возбуждения и взаимной интерференции канальных поверхностных плазмон-поляритонов.

В работе [13] было обнаружено поднятие полированной поверхности

бескислородной меди после облучения одиночным импульсом ультрафиолетового лазера наносекундной длительности. Причем этот эффект наблюдался в узком диапазоне допороговых интенсивностей воздействующего излучения. При достижении порога оптического пробоя образовывался кратер, глубина которого значительно превышала величину поднятия, поэтому в ранее проведенных многочисленных исследованиях воздействия лазерного излучения на материалы [14, 15] поднятие поверхности и сопутствующие деформационные процессы ранее не наблюдались. Следует отметить, что в монографии [15] подробно изложены результаты теоретических исследований Ф.Х. Мирзаде, посвященных кинетике нелинейных волн деформации в твердых телах при воздействии мощного лазерного импульса.

Монокристаллический кремний является одним из наиболее исследованных материалов, как с точки зрения изучения протекания процессов, которые могут иметь место на поверхности кристалла, так и в его объеме. В настоящей работе проведено исследование воздействия лазерного излучения на поверхность кремния; кремний, как материал исследования был выбран, в том числе, из-за возможности использования известных параметров физико-химических процессов, что может позволить облегчить трактовку результатов исследований.

2. Методика эксперимента

Исследования были проведены на полированных образцах из монокристалла кремния n -типа с удельным сопротивлением 1 кОм·см. Полировка поверхности была проведена по обычной оптической технологии [16]; исходная шероховатость поверхности кремния (до воздействия) составляла 50–60 Å. Как и в работе [13], эксперимент выполнялся на лазерной установке, подробно описанной в работах [17–19]. В качестве источника излучения был использован твердотельный $Nd:YAG$ лазер (третья гармоника, длина волны $\lambda = 355$ нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе – до 8 мДж, частота следования импульсов f – до 100 Гц, диаметр лазерного пучка – 3 мм, расходимость – 1–2 мрад). Образец размещался на трехкоординатном предметном столике, управляемом контроллером. Лазер и контроллер управлялись с помощью персонального компьютера.

Использовались два режима воздействия излучения на образцы:

- 1) при неподвижном пятне (30 импульсов, $f = 10$ Гц);
- 2) при сканирующем пятне – лазерный луч перемещался по образцу по растровой траектории («змейка»). Расстояние между горизонтальными строчками ~ 30 мкм ($f = 100$ Гц, длина «змейки» – 4 мм). Режим облучения

проводился с частичным перекрытием пятен; коэффициент перекрытия k составлял $\geq 99\%$. Коэффициент перекрытия определялся как отношение площади, обработанной двумя импульсами излучения, к площади одного пятна

$$k = (S_i \cap S_{i+1}) / S_i \times 100\%, \quad (1)$$

где S_i – площадь поверхности, обработанная i – м импульсом.

После воздействия поверхность образцов исследовалась с помощью оптического профилометра Zygo NewView 7300 и растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM 6610LV.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Порог оптической стойкости поверхности кремния, обычно характеризуемый появлением плазменного факела и образованием кратера на поверхности, в нашем эксперименте составлял $\sim 1,2\text{--}1,3$ Дж/см². Однако при предпороговых нагрузках также было обнаружено изменение поверхности, вызванное воздействием излучения. На рис. 1 приведены результаты воздействия излучения на поверхность кремния (30 импульсов, плотность энергии 0,7 Дж/см², частота следования – 10 Гц). В зоне облучения поверхность была испещрена многочисленными точечными образованиями с характерным размером ~ 1 мкм. Они представляли собой локальные поднятия высотой до нескольких мкм.

Рис. 1. Поверхность монокристалла кремния после воздействия 30 лазерными импульсами ($Nd:YAG$ лазер, третья гармоника, $\lambda = 355$ нм, длительность импульса 10 нс, $f = 10$ Гц, плотность энергии 0,7 Дж/см²): а – оптическая микрофотография (Zygo NewView 7300), б – профиль поверхности по центру исследуемой области.

С помощью приставки к JEOL JSM 6610LV был исследован элементный состав поврежденной зоны (см. рис. 2). Спектральный состав измерялся в трех зонах облученной области; данные в атомных процентах приведены в Таблице 1. Видно, что в зоне поднятий кремний окислился, и

образовавшиеся оксиды содержат до 30 % кислорода. В зоне 2, где, хотя и не наблюдались видимые следы повреждений, также присутствует до 5 % кислорода.

Таблица 1. Спектральный состав облученной области кремния (в атомных процентах).

Спектр	O	Si
Спектр 1 общий	17,97	82,03
Спектр 2 чистый	4,98	95,02
Спектр 3 выделения	30,69	69,31
Среднее	17,88	82,12

Рис. 2. РЭМ микрофотография облученной поверхности монокристалла кремния с указанием зон, в которых измеряли элементный состав (параметры *Nd*:YAG лазера соответствуют рис. 1).

При сканирующем пятне излучения при плотности энергии 0,2 Дж/см² (частота 100 Гц) повреждения носили фрагментарный характер (см. рис. 3). Наблюдались следы микропробоев с характерным размером несколько мкм, которые, возможно, возникли на дефектах оптической обработки поверхности. С увеличением плотности энергии расстояние между пятнами уменьшалось, размер пятен увеличивался, и при энергиях 0,6–0,7 Дж/см² образовывалось сплошное поле повреждений (см. рис. 4).

При исследовании на атомно-силовом микроскопе обнаружено, что поверхность покрыта мелкозернистым слоем, размер зерен составил 150–400 нм.

Рис. 3. Результаты воздействия сканирующего лазерного излучения на поверхность кремния (плотность энергии $0,2 \text{ Дж/см}^2$, $f = 100 \text{ Гц}$): а, б – РЭМ микрофотографии при увеличении $\times 50$ и $\times 1000$ соответственно, в – профиль поверхности.

Рис. 4. Результаты воздействия сканирующего лазерного излучения на поверхность кремния (плотность энергии $0,7 \text{ Дж/см}^2$, $f = 100 \text{ Гц}$): а – РЭМ микрофотография, б – профиль поверхности.

4. Выводы

При воздействии на поверхность монокристалла кремния импульсами излучения наносекундного ультрафиолетового лазера ($\lambda = 355 \text{ нм}$) при плотности энергии $\geq 0,2 \text{ Дж/см}^2$, возникают очаги микропробоя на дефектах обработки, имеют место следы неконтролируемого поднятия поверхности.

При плотности энергии $\geq 1,2$ Дж/см² зафиксирован порог оптической стойкости с образованием плазменного факела и кратера на поверхности. Облучение сканирующим пучком лазера при плотности энергии 0,2 Дж/см² вызывает микропробой поверхности размером несколько мкм. С увеличением плотности энергии размер микропробоев увеличивался, и при энергиях $\geq 0,7$ Дж/см² воздействие сканирующим лучом образует сплошную зону повреждений.

Авторы признательны Е.В. Барабановой за выполненные измерения на АСМ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проекты № 0057-2019-0005 и № 0817-2020-0007) с использованием ресурсов ЦКП Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. **Zimmermann, H.** Silicon optoelectronic integrated circuits / H. Zimmermann // In: Springer Series in Advanced Microelectronics. – 2nd ed. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. – V. 13. – XXI, 441 p. DOI: 10.1007/978-3-030-05822-7.
2. **Герасименко, Н.Н.** Кремний – материал нанoeлектроники / Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. – М.: Техносфера, 2007. – 352 с.
3. **Crouch, C.H.** Comparison of structure and properties of femtosecond and nanosecond laser-structured silicon / C.H. Crouch, J.E. Carey, J.M. Warrender, et al. // Applied Physics Letters. – 2004. – V. 84. – I. 11. – P. 1850-1852. DOI: 10.1063/1.1667004.
4. **Costache, F.** Self-assembled surface patterning and structural modification upon femtosecond laser processing of crystalline silicon / F. Costache, S. Kouteva-Arguirova, J. Reif // Solid State Phenomena. – 2004. – V. 95-96. – P. 635-640. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.95-96.635.
5. **Harzic, R.Le.** Formation of periodic nanoripples on silicon and germanium induced by femtosecond laser pulses physics / R.Le Harzic, D. Dörr, D. Sauer, et al. // Physics Procedia. – 2011. – V. 12. – P. 29-36. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.102.
6. **Nayak B.N.** Self-organized 2D periodic arrays of nanostructures in silicon by nanosecond laser irradiation / B.K. Nayak, K. Sun, C. Rothenbach, M.C. Gupta // Applied Optics. – 2011. – V. 50. – I. 16. – P. 2349-2355. DOI: 10.1364/AO.50.002349.
7. **Pedraza, A.J.** Silicon microcolumn arrays grown by nanosecond pulsed-excimer laser irradiation / A.J. Pedraza, J.D. Fowlkes, D.H. Lowndes // Applied Physics Letters. – 1999. – V. 74. – P. 2322-2324. DOI: 10.1063/1.123838.
8. **Pedraza, A.J.** Surface nanostructuring of silicon / A.J. Pedraza, J.D. Fowlkes, Y.F. Guan // Applied Physics A. – 2003. – V. 77. – I. 2. – P. 277-284. DOI: 10.1007/s00339-003-2113-9.
9. **Reif, J.** Self-organized regular surface patterning by pulsed laser ablation / J. Reif, F. Costache, O. Varlamova, G. Jia, M. Ratzke // Physica Status Solidi C. – 2009. – V. 6. – I. 3. – P. 681-686. DOI: 10.1002/pssc.200880719.
10. **Makin, V.S.** Thermal waveguide and fine scale periodic relief on the semiconductor's surface induced by CO_2 laser radiation / V.S. Makin, Yu.I. Pestov, V.E. Privalov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2012. – V. 21. – I. 1.

– P. 52-61. DOI: 10.3103/S1060992X12010079.

11. **Makin, V.S.** Interaction of laser radiation with an axially symmetric polarization with condensed media / V.S. Makin, R.S. Makin // *Optics and Spectroscopy*. – 2013. – V. 115. – I. 4. – P. 591-595. DOI: 10.1134/S0030400X13070102.

12. **Makin, V.S.** Localized surface plasmon polaritons and nonlinear overcoming of the diffraction optical limit / V.S. Makin, E.I. Logacheva, R.S. Makin // *Optics and Spectroscopy*. – 2016. – V. 120. – I. 4. – P. 610-614. DOI: 10.1134/S0030400X16040172.

13. **Malinskiy, T.V.** Plastic deformation of copper under the action of high-power nanosecond UV laser pulse / T.V. Malinskiy, S.I. Mikolutskiy, V.E. Rogalin, et al. // *Technical Physics Letters*. – 2020. – V. 46. – I. 8. – P. 831-834. DOI: 10.1134/S1063785020080234.

14. **Анисимов, С.И.** Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко. – М.: Наука, 1970. – 272 с.

15. **Панченко, В.Я.** Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / В.Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.

16. **Окатов, М.А.** Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

17. **Железнов, Ю.А.** Экспериментальная установка по микро- и наноструктурированию поверхности твердых тел лазерным излучением / Ю.А. Железнов, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий и др. // *Прикладная физики*. – 2014. – № 3. – С. 83-87.

18. **Ganin, D.V.** Formation of micron and submicron structures on a zirconium oxide surface exposed to nanosecond laser radiation / D.V. Ganin, S.I. Mikolutskiy, V.N. Tokarev, et al. // *Quantum Electronics*. – 2014. – V. 44. – № 4. – P. 317-321. DOI: 10.1070/QE2014v044n04ABEH015219.

19. **Mikolutskiy, S.I.** Formation of various types of nanostructures on germanium surface by nanosecond laser pulses / S.I. Mikolutskiy, R.R. Khasaya, Yu.V. Khomich, V.A. Yamshchikov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 987. Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference 2017 (ANNIC 2017) 18-20 October 2017, Rome, Italy. – Art. № 012007. – 5 p. DOI: 10.1088/1742-6596/987/1/012007.

References:

1. **Zimmermann, H.** Silicon optoelectronic integrated circuits / H. Zimmermann // In: *Springer Series in Advanced Microelectronics*. – 2nd ed. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. – V. 13. – XXI, 441 p. DOI: 10.1007/978-3-030-05822-7.

2. **Gerasimenko, N.N.** Кремний – материал нанотехники [Silicon – a material of nanoelectronics] / N.N. Gerasimenko, Yu.N. Parkhomenko. – М.: Техносфера, 2007. – 352 p.

3. **Crouch, C.H.** Comparison of structure and properties of femtosecond and nanosecond laser-structured silicon / C.H. Crouch, J.E. Carey, J.M. Warrender, et al. // *Applied Physics Letters*. – 2004. – V. 84. – I. 11. – P. 1850-1852. DOI: 10.1063/1.1667004.

4. **Costache, F.** Self-assembled surface patterning and structural modification upon femtosecond laser processing of crystalline silicon / F. Costache, S. Kouteva-Arguirova, J. Reif // *Solid State Phenomena*. – 2004. – V. 95-96. – P. 635-640. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.95-96.635.

5. **Harzic, R.Le.** Formation of periodic nanoripples on silicon and germanium induced by

- femtosecond laser pulses physics / R.Le Harzic, D. Dörr, D. Sauer, et al. // *Physics Procedia*. – 2011. – V. 12. – P. 29-36. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.102.
6. **Nayak B.N.** Self-organized 2D periodic arrays of nanostructures in silicon by nanosecond laser irradiation / B.K. Nayak, K. Sun, C. Rothenbach, M.C. Gupta // *Applied Optics*. – 2011. – V. 50. – I. 16. – P. 2349-2355. DOI: 10.1364/AO.50.002349.
7. **Pedraza, A.J.** Silicon microcolumn arrays grown by nanosecond pulsed-excimer laser irradiation / A.J. Pedraza, J.D. Fowlkes, D.H. Lowndes // *Applied Physics Letters*. – 1999. – V. 74. – P. 2322-2324. DOI: 10.1063/1.123838.
8. **Pedraza, A.J.** Surface nanostructuring of silicon / A.J. Pedraza, J.D. Fowlkes, Y.F. Guan // *Applied Physics A*. – 2003. – V. 77. – I. 2. – P. 277-284. DOI: 10.1007/s00339-003-2113-9.
9. **Reif, J.** Self-organized regular surface patterning by pulsed laser ablation / J. Reif, F. Costache, O. Varlamova, G. Jia, M. Ratzke // *Physica Status Solidi C*. – 2009. – V. 6. – I. 3. – P. 681-686. DOI: 10.1002/pssc.200880719.
10. **Makin, V.S.** Thermal waveguide and fine scale periodic relief on the semiconductor's surface induced by CO_2 laser radiation / V.S. Makin, Yu.I. Pestov, V.E. Privalov // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2012. – V. 21. – I. 1. – P. 52-61. DOI: 10.3103/S1060992X12010079.
11. **Makin, V.S.** Interaction of laser radiation with an axially symmetric polarization with condensed media / V.S. Makin, R.S. Makin // *Optics and Spectroscopy*. – 2013. – V. 115. – I. 4. – P. 591-595. DOI: 10.1134/S0030400X13070102.
12. **Makin, V.S.** Localized surface plasmon polaritons and nonlinear overcoming of the diffraction optical limit / V.S. Makin, E.I. Logacheva, R.S. Makin // *Optics and Spectroscopy*. – 2016. – V. 120. – I. 4. – P. 610-614. DOI: 10.1134/S0030400X16040172.
13. **Malinskiy, T.V.** Plastic deformation of copper under the action of high-power nanosecond UV laser pulse / T.V. Malinskiy, S.I. Mikolutskiy, V.E. Rogalin, et al. // *Technical Physics Letters*. – 2020. – V. 46. – I. 8. – P. 831-834. DOI: 10.1134/S1063785020080234.
14. **Anisimov, S.I.** Deistvie izlucheniya bol'shoi moshchnosti na metally [Effects of high power radiation on metals] / S.I. Anisimov, Ya.A. Imas, G.S. Romanov, Yu.V. Khodyko. – M.: Nauka, 1970. – 272 p. (In Russian).
15. **Panchenko, V.Ya.** Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennyye problemy fundamental'nykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok [Laser technologies for material processing: modern problems of fundamental research and applied development] / V.Ya. Panchenko. – M.: Fizmatlit, 2009. – 664 p. (In Russian).
16. **Okatov, M.A.** Spravochnik tekhnologa-optika [Directory of technologist-optician] / M.A. Okatov. – SPb.: Politehnika, 2004. – 679 p. (In Russian).
17. **Zheleznov, Yu.A.** Eksperimental'naya ustanovka po mikro- i nanostrukturirovaniyu poverkhnosti tverdykh tel lazernym izlucheniem [Experimental setup for direct laser micro- and nanostructuring of solid surface] / Yu.A. Zheleznov, T.V. Malinskii, S.I. Mikolutskii dr. // *Prikladnaya fizika*. – 2014. – № 3. – P. 83-87. (In Russian).
18. **Ganin, D.V.** Formation of micron and submicron structures on a zirconium oxide surface exposed to nanosecond laser radiation / D.V. Ganin, S.I. Mikolutskiy, V.N. Tokarev, et al. // *Quantum Electronics*. – 2014. – V. 44. – № 4. – P. 317-321. DOI: 10.1070/QE2014v044n04ABEH015219.
19. **Mikolutskiy, S.I.** Formation of various types of nanostructures on germanium surface by nanosecond laser pulses / S.I. Mikolutskiy, R.R. Khasaya, Yu.V. Khomich, V.A. Yamshchikov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 987. Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference 2017 (ANNIC 2017)

18-20 October 2017, Rome, Italy. – Art. № 012007. – 5 p. DOI: 10.1088/1742-6596/987/1/012007.

Original paper

**MODIFICATION OF SILICON SURFACE UNDER INFLUENCE OF RADIATION OF A
NANOSECOND ULTRAVIOLET LASER**

T.V. Malinskiy¹, S.I. Mikolutskiy¹, V.E. Rogalin¹, Yu.V. Khomich¹, V.A. Yamshchikov¹,
I.A. Kaplunov², A.I. Ivanova²

¹*Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences*

²*Tver State University*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.628

Abstract: The effect of radiation of a nanosecond ultraviolet laser ($\lambda = 355$ nm, pulse duration 10 ns, pulse energy up to 8 mJ, pulse repetition rate – up to 100 Hz) on a silicon single crystal has been investigated by methods of the optical profilometry and scanning electron microscopy. At an energy density of $\geq 1,2$ J/cm², formation of the plasma torch and crater was observed. At an energy density of $\geq 0,2$ J/cm², pockets of microbreakdown appeared on processing defects, and traces of uncontrolled surface uplift were recorded. Irradiation with a scanning laser beam at an energy density of 0,2 J/cm² forms microcraters on a surface with a size of several microns. With an increase in the energy density, the size of the microbreakdowns increased, and at an energy density $\geq 0,7$ J/cm², the impact of the scanning beam forms a continuous damage zone.

Keywords: *laser impact, silicon single crystal, UV laser, nanosecond pulse, micro- and nanomodification of the surface, plastic deformation.*

Малинский Тарас Владимирович – к.т.н., доцент, заведующий лабораторией электроразрядной и лазерной техники, ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук» (московский филиал)

Миколуцкий Сергей Иванович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории электрогидродинамических систем, ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук»

Рогалин Владимир Ефимович – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией мощной импульсной техники, ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук»

Хомич Юрий Владиславович – научный сотрудник лаборатории электроразрядной и лазерной техники, ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук»

Ямищиков Владимир Александрович – член-корреспондент РАН, д.т.н., ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук» (директор Московского филиала)

Каплунов Иван Александрович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Taras V. Malinskiy – Ph. D., Docent, Head of the Laboratory of Electric Discharge and Laser Technology, Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences (Moscow Branch)

Sergey I. Mikolutskiy – Ph. D., Senior Researcher of Laboratory of Electrohydrodynamic systems, Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences

Vladimir E. Rogalin – Dr. Sc., Head of Laboratory of Powerful Pulse Systems, Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences

Yuriy V. Khomich – Researcher of Laboratory of Electric Discharge and Laser Technology, Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences

Vladimir A. Yamshchikov –Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc., Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences (Director of Moscow Branch)

Ivan A. Kaplunov – Dr. Sc., Chief of the Department of Applied Physics, Tver State University

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent of the Applied Physic Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 01.08.2020; после рецензирования/revised: 31.08.2020; принята/accepted 15.09.2020.