



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-125-7-152-156>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 553.823

## ФЕМТОСЕКУНДНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ САПФИРА НА ДЛИНАХ ВОЛН 1040 И 520 НМ

ШУЛЕНКОВА В.А.<sup>1</sup>, ЛУЦЕНКО Е.В.<sup>1</sup>, ДАНИЛЬЧИК А.В.<sup>1</sup>, СОЛОВЬЁВ Я.А.<sup>2</sup>,  
ПЕТЛИЦКИЙ А.Н.<sup>2</sup>, КИРОСИРОВА М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«Институт физики НАН Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18 ноября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

**Аннотация.** Резка сапфира в настоящее время является одной из крупнейшей развивающейся области лазерной обработки материалов. Сапфир является одним из самых твердых прозрачных материалов. Его механические и оптические свойства сделали его идеальной и ценной основой для создания различных устройств, например, таких как защитные стекла для часов, дисплеи мобильных устройств, защитные стекла для камер и подложки для светодиодов и транзисторов. Среди существующих способов резки с помощью лазерных или алмазных инструментов, фемтосекундное лазерное скрайбирование является многообещающей технологией, поскольку эта технология обладает уникальной способностью производить высоколокализованную объемную модификацию благодаря нелинейному поглощению. Резка сапфира твердотельными лазерами хорошо известна уже в течение многих лет и стала современным промышленным процессом. Однако скорость и качество процесса резки до сих пор ограничены, а эксплуатационные расходы относительно высоки. Целью работы, результаты которой представлены в рамках данной статьи, является улучшение скорости и качества резки. В статье описаны результаты исследования фемтосекундного лазерного скрайбирования сапфира при длинах волн 1040 и 520 нм с последующим жидкостным травлением в смеси азотной и плавиковой кислот для выявления формирующихся дефектов и трещин. Морфология поверхности сапфира, подвергнутого лазерной абляции, оценена методом сканирующей электронной микроскопии. Показано, что на основной частоте материал эффективно удаляется с поверхности, однако при этом формируются расходящиеся по поверхности трещины на расстояние до 40 мкм. Использование второй гармоники дало более аккуратные и глубокиерезы по сравнению с основной частотой при той же энергии импульса, что обусловлено меньшей размерностью многофотонных процессов. При этом формируются анизотропные трещины, расходящиеся в объем материала. Таким образом, показаны возможности применения фемтосекундной лазерной абляции в технологических процессах скрайбирования для изготовления устройств на основе сапфира.

**Ключевые слова:** фемтосекундный лазер, абляция сапфира, скрайбирование, жидкостное травление.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Шуленкова В.А., Луценко Е.В., Данильчик А.В., Соловьёв Я.А., Петлицкий А.Н., Киросирова М.В. Фемтосекундное лазерное скрайбирование сапфира на длинах волн 1040 и 520 нм. Доклады БГУИР. 2019; 7(12): 152-156.

## FEMTOSECOND LASER SCRIBING OF SAPPHIRE AT WAVELENGTH 1040 AND 520 NM

BARBARA A. SHULENKOVA<sup>1</sup>, EVGENY V. LUTSENKO<sup>1</sup>, ALEKSANDR V. DANILCHIK<sup>1</sup>,  
JAROSLAV A. SOLOVJOV<sup>2</sup>, ALEKSANDR N. PYATLITSKI<sup>2</sup>, MARIA V. KIRASIRAVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*B.I. Stepanov Institute of Physics of NAS of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*«Integral» holding managing company, Minsk, Belarus*

*Submitted 18 November 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

**Abstract.** Sapphire cutting is one of the largest markets in laser materials processing. Since sapphire is one of the hardest transparent materials its mechanical and optical properties made it the ideal choice for use in the production of various devices, such as LEDs and transistors, cover glasses of watches and mobile devices. Among existing laser- or diamond-based tools solutions, femtosecond laser scribing appear as a promising technology since this technology has the unique capacity to produce highly localized bulk modification owing to non-linear absorption. Sapphire cutting with solid-state lasers is well known for many years and has become a modern industrial process. However, achievable process speed and cut quality are still limited. The femtosecond laser scribing of sapphire was studied at wavelengths of 1040 and 520 nm, followed by wet etching in HNO<sub>3</sub>/HF solution to identify emerging defects. The morphology of the laser ablated sapphire surface was evaluated by scanning electron microscopy. It was shown that at the wavelength of 1040nm, the material was effectively removed from the surface; however, cracks on the surface were formed. The use of the second harmonic gave more accurate and deep cuts compared with the main frequency at the same conditions. At the wavelength of 520 nm, the cracks were formed anisotropically inside the volume of the material. Therefore, there is a potential application of the femtosecond laser scribing for the fabrication of sapphire-based devices.

**Keywords:** femtosecond laser, ablation of sapphire, wet etching, scribing.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Shulenkova B.A., Lutsenko E.V., Danilchik A.V., Solovjov Ja.A., Pyatlitski A.N., Kirasirava M.V. Femtosecond laser scribing of sapphire at wavelength 1040 and 520 nm. Doklady BGUIR. 2019; 7(125): 152-156.

### Введение

Сапфир, обладая уникальными механическими, оптическими и электрическими свойствами, широко применяется при создании различных устройств. Однако сложность в работе с сапфиром заключается в его высокой твердости, хрупкости и химической стабильности. Поскольку сапфир инертен к воздействию большинства типов жидкостного и плазменного травления, то в качестве перспективного метода обработки сапфира актуальна лазерная абляция, которая позволяет производить быструю модификацию сапфира. Использование лазера для работы с сапфиром позволяет осуществлять удаление материала с минимальными локализованными тепловыми эффектами, например, трещинами [1], особенно при использовании сверхкоротких лазерных импульсов.

Фемтосекундные лазеры обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с обычными лазерами: ультракороткая длительность импульса и чрезвычайно высокая пиковая интенсивность. Из-за этих параметров фемтосекундный лазер применяется для работы с сапфиром. Во-первых, нелинейный характер абсорбции ограничивает любое индуцированное повреждение только в фокальном объеме. Во-вторых, процесс ионизации происходит быстрее, чем распространение тепла по объему. Все это обеспечивает высокую точность резки с минимальными повреждениями. Фемтосекундная лазерная абляция особенно актуальна при резке светодиодных пластин на чипы.

Хотя физическая картина взаимодействия фемтосекундного лазера с веществом не совсем ясна, следующий механизм является общепринятым [2]. Когда фемтосекундный лазерный импульс с высокой плотностью мощности взаимодействует с сапфиром, энергия

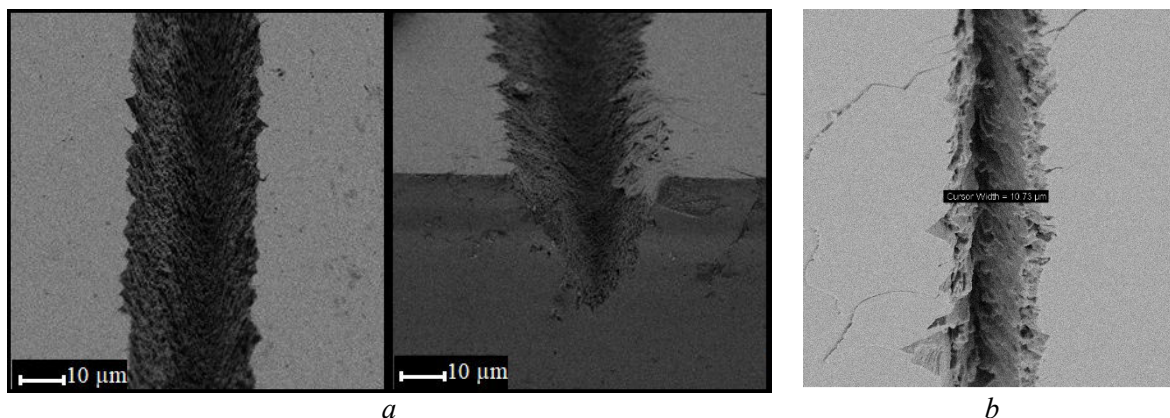
лазера сначала поглощается прозрачным материалом в многофотонных нелинейных процессах, что вызывает генерацию фотоэлектронов. Эти электроны затем передают свою кинетическую энергию решетке в течение пикосекундного периода времени. Далее, тепло рассеивается, материал плавится и происходят кулоновский взрыв и фрагментация расплава, причем последнее преобладает при высоких интенсивностях [1–3], что приводит к структурным изменениям. Однако это только качественное описание, и наведенные эффекты зависят от химической природы и физических свойств материала и условий лазерного облучения. В [4–6] сообщается о скрайбировании и резке сапфира с использованием ультракоротких импульсов, представлены результаты исследования влияния количества импульсов и их энергии на поверхностную модификацию сапфира, а также на глубину и ширину прорезанных отверстий. В данной работе абляция сапфира фемтосекундными лазерными импульсами проводилась при длинах волн излучения лазера 1040 нм и 520 нм. Качество и морфология поверхности сапфира были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа.

### Методика проведения эксперимента

В данной работе скрайбинг сапфира (толщина – 400 мкм) проводился на KYW: Yb фемтосекундном лазере ( $M^2 = 1,3$ ) с накачкой полупроводниковым лазером, который генерировал импульсы длительностью  $\tau_n = 300$  фс, частотой 62 кГц и максимальной энергией, равной 14 и 3,2 мкДж на длинах волн 1040 и 520 нм (вторая гармоника) соответственно. Лазерное излучение проходило через объектив микроскопа 20x с числовой апертурой 0,40 и фокусировалось в перетяжку с диаметром 3,25 и 1,7 мкм для длин волн 1040 и 520 нм соответственно. Образцы помещали на моторизованную прецизионную подвижку и сканировали на разных скоростях. Все эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре. После облучения образцы очищали в ультразвуковой ванне. Морфологию поверхности образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) для оценки ширины и глубины профиля резов, наличия трещин.

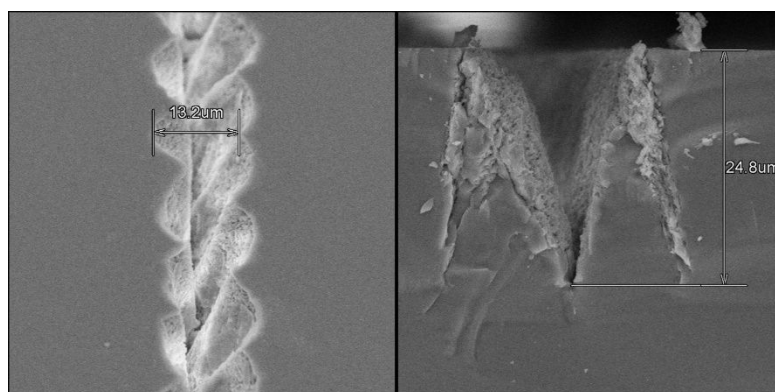
### Результаты и их обсуждение

При скрайбировании на длине волны 1040 нм все эксперименты проводились при скоростях сканирования от 0,4 до 12,5 мм/с. При низкой средней мощности лазера (0,1–0,3 Вт) и низкой скорости сканирования, что примерно соответствует условиям эксперимента для второй гармоники, ширина резов составила ~4 мкм, что значительно меньше, чем для второй гармоники. При этом удаление материала практически не происходило, формировался неровный край, с расплавленным материалом внутри и на краях. При средней мощности лазера более 0,4 Вт в перетяжке в воздухе появлялась лазерная искра. При этом ширина резов увеличивалась до 30 мкм, глубина до 25 мкм и объем удаленного материала увеличивался, что приводило к распылению материала на большую поверхность (рис. 1, а). Распыленный материал легко удалялся с помощью последующей ультразвуковой очистки. Вероятно, ударная волна, создаваемая искровым разрядом, создает более эффективное распыление материала. Увеличение скорости сканирования от 0,4 до 12,5 мм/с приводит к уменьшению ширины и глубины реза. Расхождение трещин по поверхности и по глубине до травления не наблюдалось. После травления в растворе HF/HNO<sub>3</sub> на поверхности сапфира проявлялись трещины до 40 мкм, но при этом не наблюдалось протравливание по глубине (рис. 1, б).



**Рис. 1.** СЭМ-изображения резов при  $\lambda=1040$  нм, мощности лазера 0,8 Вт и скорости сканирования 0,4 мм/с после ультразвуковой очистки (а); СЭМ изображение реза после травления в растворе HF/HNO<sub>3</sub> (b)  
**Fig. 1.** SEM images of cut after laser processing at  $\lambda=1040$  nm, laser power 0.8 W, scan speed 0.4 mm/s (a); SEM image of the same cut after etching in HF/HNO<sub>3</sub> solution (b)

При скрайбировании на длине волны 520 нм эксперименты проводились при скорости сканирования 0,5 мм/с при средней мощности 200 мВт. Как видно из рис. 2, формировался край абляционной канавки змеевидной формы со средней шириной реза 15 мкм и глубиной 5 мкм. Распространение трещин по объему материала происходило на расстояния до 40 мкм по всем направлениям. После химического травления в растворе HF/HNO<sub>3</sub> происходило вымывание аморфного (модифицированного лазерным излучением) сапфира, что приводило к значительному увеличению глубины реза (до 25 мкм). Необходимо отметить, что травление также приводило к проявлению трещин, имеющих анизотропию направления. Как видно из рис. 2, трещины направлены вниз от поверхности сапфира и образуют фигуру с канавкой наподобие буквы М, что свидетельствует об анизотропии распространения взрывной волны при данном лазерном воздействии. Необходимо отметить, что поверхностные трещины травлением выявлены не были. Подобное направление распространения трещин возможно важно с точки зрения минимизации объема материала, поврежденного при лазерном воздействии.



**Рис. 2.** СЭМ изображение реза при  $\lambda=520$  нм, мощности лазера 0,2 Вт, скорости сканирования 0,5 мм/с, после травления в растворе HF/HNO<sub>3</sub>  
**Fig. 2.** SEM images of cut after laser processing at  $\lambda=520$  nm, laser power 0.2 W, scan speed 0.5 mm/s after etching in HF/HNO<sub>3</sub>

### Заключение

Продемонстрированы результаты лазерного скрайбирования сапфира с шириной резов 15–30 мкм в зависимости от мощности лазера. Показано, что на основной частоте низкая скорость сканирования и высокая мощность лазера обеспечивают условия, при которых происходит эффективная абляция, однако при этом формируются трещины с расхождением по поверхности до 40 мкм. Использование второй гармоники дает более аккуратные и глубокие резы, по сравнению с основной частотой при той же энергии импульса. При этом трещины,

в отличие от основной частоты, формируются анизотропно, они направлены в объем, а не расходятся по поверхности. Все это указывает на перспективы использования второй гармоники для скрайбирования сапфира. Однако энергия импульса должна быть увеличена примерно в 3 раза для получения ровных краев резов и увеличения их глубины. При правильно подобранных условиях может быть достигнута более глубокая абляция.

### Список литературы / References

1. Miotello A., Ossi P. *Laser-Surface Interactions for New Materials Production*. Springer; 2010.
2. Tan D., Sharafudeen K.N., Yue Y., Qiu J., Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*. 2016. Vol. 76:154–228.
3. Puerto D., Siegel J., Gawelda W., Galvan-Sosa M., Ehrentraut L., Bonse J., Solis J. Dynamics of plasma formation, relaxation, and topography modification induced by femtosecond laser pulses in crystalline and amorphous dielectrics. *J. Opt. Soc. Am. B*. 2010; Vol. 27 (5): 1065-1076.
4. Eberle G., Schmidt M., Pude F., Wegener K. Laser surface and subsurface modification of sapphire using femtosecond pulses. *Applied Surface Science*. 2016; Vol. 378: 504-512.
5. Qi L., Nishii K., Yasui M., Aoki H., Namba Y., Femtosecond laser ablation of sapphire on different crystallographic facet planes by single and multiple laser pulses irradiation. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010. Vol. 48: 1000–1007.
6. Watanabe W., Li Y., Itoh K., Ultrafast laser micro-processing of transparent material *Optics & Laser Technology*. 2016; Vol. 78 (A): 52-61.

#### Сведения об авторах

Шуленкова В.А., младший научный сотрудник  
Института физики НАН Беларуси им. Б.И. Степанова.

Луценко Е.В., к.ф.-м.н., доцент, заместитель  
заведующего центром Института физики НАН  
Беларуси.

Данильчик А.В., научный сотрудник Института  
физики НАН Беларуси.

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора  
филиала «Транзистор» ОАО «Интеграл» –  
управляющей компании холдинга «Интеграл».

Петлицкий А.Н., к.ф.-м.н., доцент, директор  
ГЦ «Белмикросистем» филиала «НПЦ Белмикросистем»  
ОАО «Интеграл» – управляющей компании  
холдинга «Интеграл».

Кирасирова М.В., инженер ГЦ «Белмикросистем»  
филиала «НПЦ Белмикросистем» ОАО «Интеграл» –  
управляющей компании холдинга «Интеграл».

#### Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,  
Минск, пр. Независимости, 68-2,  
Государственное научное учреждение  
«Институт физики имени Б.И. Степанова  
национальной академии наук Беларуси»  
тел.+375-17-294-90-28;  
e-mail: shulenkovab@gmail.com  
Шуленкова Варвара Алексеевна

#### Information about the authors

Shulenkova B.A., Junior Researcher of B.I. Stepanov  
Institute of Physics of NAS of Belarus.

Lutsenko E.V., PhD, Associate Professor, Deputy  
Head of Centrum of B.I. Stepanov Institute of Physics  
of NAS of Belarus.

Danilchik A.V., researcher of B.I. Stepanov Institute  
of Physics of NAS of Belarus.

Solovjov Ja.A., PhD, Associate Professor, Deputy  
Director of «Transistor» Branch of «Integral»  
holding managing company.

Pyatlitski A.N., PhD, Associate Professor, Director  
of SC «Belmicroanalysis» of «Belmicrosystems»  
Branch of «Integral» holding managing company.

Kirasirava M.V., engineer of SC «Belmicroanalysis»  
of «Belmicrosystems» Branch of «Integral» holding  
managing company.

#### Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti ave., 68-2,  
The State Scientific Institution  
«B.I. Stepanov Institute of Physics of the National  
Academy of Sciences of Belarus»  
tel. +375-17-294-902-8;  
e-mail: shulenkovab@gmail.com  
Shulenkova Barbara Alexeevna