

УДК 621.373.8:621.937:549.517.14

## Моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания сапфира

С.В. ШАЛУПАЕВ, Ю.В. НИКИТЮК, А.А. СЕРЕДА

Выполнено численное моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического сапфира с использованием метода конечных элементов. Расчет полей термоупругих напряжений, формируемых в монокристаллической сапфировой пластине в результате последовательного двулучевого лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для среза в плоскости (0001) или C-плоскости с учетом анизотропии тепловых и упругих свойств сапфира. Моделирование выполнено для случая одновременного воздействия лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм и 5 мкм на пластины толщиной 0,2; 0,4 и 1 мм. Результаты моделирования можно использовать для оптимизации технологических режимов разделения пластин сапфира.

**Ключевые слова:** лазер, термораскалывание, трещина, термоупругие напряжения, анизотропия, сапфир.

Numerical simulation of the process of controlled laser thermal cracking of crystalline sapphire using the finite element method is performed. The calculation of the thermoelastic stresses formed in a single-crystal sapphire plate as a result of successive two-beam laser heating and the action of a coolant was carried out for cutting in (0001) or C-plane, taking into account the anisotropy of the thermal and elastic properties of the sapphire. The simulation was carried out for the case of simultaneous action of laser radiation with a wavelength of 10.6  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$  on plates 0.2 thick; 0.4 and 1 mm. The simulation results can be used to optimize the technological regimes of separation of sapphire plates.

**Keywords:** laser, thermal cracking, crack, thermoelastic stresses, anisotropy, sapphire.

Одним из наиболее эффективных методов прецизионного разделения хрупких неметаллических материалов является управляемое лазерное термораскалывание. Отличительной особенностью данного метода является разделение материала вследствие образования трещины, формируемой при последовательном лазерном нагреве и воздействии хладагента. К основным преимуществам управляемого лазерного термораскалывания относятся высокая точность разделения и высокая скорость обработки, его безотходность. Данный метод успешно применяется при разделении изотропных и анизотропных хрупких неметаллических материалов [1]–[5]. В работах [4]–[6] предложен алгоритм моделирования хрупких неметаллических материалов с учетом анизотропии теплофизических свойств материала и выполнен анализ динамики формирования полей термоупругих напряжений в кристаллах с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой типа алмаза в процессе управляемого лазерного термораскалывания. Показано, что при выборе технологических режимов разделения таких материалов, вырезанных в различных кристаллографических плоскостях, необходимо учитывать анизотропию их свойств. В работах [3], [6]–[8] показан положительный эффект применения двулучевого лазерного воздействия на данные материалы. При этом один из источников выбирается с длиной волны, соответствующей поверхностному поглощению материалом, а второй – поглощению в объеме материала.

Однако наряду с этими типами кристаллов в современной микроэлектронике широко используются и другие кристаллы, в частности сапфир.

В настоящее время сапфир широко применяется в различных областях промышленности. В нем сочетаются такие свойства как высокая прозрачность, устойчивость к ультрафиолетовому излучению, устойчивость к механическим повреждениям и высоким температурам, высокие диэлектрические свойства, особенности кристаллической решетки, позволяющие выращивать на нем эпитаксиальные слои, малый коэффициент трения и др.

Сапфир применяется в оптических и оптоэлектронных приборах при изготовлении смотровых окон, линз и призм, световодов для широкого спектра излучения при любых температурах, а также для производства оболочек специальных ламп и защитных колпаков навигационных устройств.

Важные достоинства сапфировой подложки – инертность, способность работы при высоких температурах и механических нагрузках. В настоящее время сотни промышленных установок во всем мире производят эпитаксиальные гетероструктуры на основе нитридов алюминия, галлия, индия при массовом изготовлении светодиодов и транзисторов на сапфи-

ровых подложках. Объемы годового выпуска светодиодов и транзисторов на сапфировых подложках составляют миллиарды штук в год. Поэтому развитие технологии изготовления приборов на сапфировых подложках весьма важно.

В связи с этим целесообразно проведение трехмерного моделирования процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического сапфира с учетом его анизотропии.

Для моделирования процессов лазерного термораскалывания использован метод конечных элементов [9]. При моделировании управляемого лазерного термораскалывания на первом этапе выполнялся расчёт полей температур, а затем решалась задача о нахождении термоупругих напряжений, формируемых в результате воздействия лазерного излучения и хладагента на поверхность сапфировых пластин. Такая последовательность моделирования обеспечивает получение результатов в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке. С физической точки зрения, квазистатическая постановка задачи термоупругости означает использование предположения о том, что напряженное состояние устанавливается значительно быстрее, чем достигается тепловое равновесие [10].

В качестве критерия, определяющего направление развития трещины, был выбран критерий максимальных растягивающих напряжений [11]. В соответствии с этим критерием лазерная микротрещина распространяется в направлении, перпендикулярном действию максимальных растягивающих напряжений. При этом принято во внимание, что трещина, распространяющаяся в зоне растяжения, прекращает свой рост в зоне сжатия.

Моделирование выполнено для пластин сапфира, вырезанных в плоскости С (0001), матрица  $\{C_{ik}\}$  которой с учетом кристаллографической структуры сапфира приобретает вид [12]:

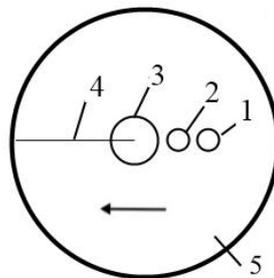
$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} \end{pmatrix}$$

Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости:  $C_{11}=4,97 \cdot 10^5$  МПа,  $C_{12}=1,626 \cdot 10^5$  МПа,  $C_{13}=1,172 \cdot 10^5$  МПа,  $C_{14}=-0,229 \cdot 10^5$  МПа,  $C_{33}=4,981 \cdot 10^5$  МПа,  $C_{44}=1,472 \cdot 10^5$  МПа [13].

На рисунке 1 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки.

Горизонтальной стрелкой на рисунке 1 указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

Исходя из спектра пропускания сапфира, представленного в источнике [14], в качестве источника излучения, энергия которого поглощается в тонком поверхностном слое материала, использован непрерывный лазер с длиной волны 10,6 мкм, а в качестве источника излучения с объемным поглощением выбран лазер с длиной волны 5 мкм (коэффициент поглощения сапфиром  $k = 91,6 \text{ м}^{-1}$ ). Теплофизические свойства сапфира для расчетов взяты из источников [12]–[16].



1 – лазерный пучок с длиной волны 10,6 мкм, 2 – лазерный пучок с длиной волны 5 мкм, 3 – хладагент, 4 – лазерно-индуцированная микротрещина, 5 – сапфировая пластина

Рисунок 1 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки

Расчеты были выполнены для дисков радиусом 15,5 мм и толщиной  $h = 0,2$  мм,  $h = 0,4$  мм и  $h = 1$  мм. Радиус пятен обоих пучков  $R = 1,5$  мм, плотность мощности излучения  $10,6$  мкм составляет  $6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, мощность источника с длиной волны  $5$  мкм –  $140$  Вт, а доля поглощаемой энергии в пластинах разной толщины рассчитана из закона Бугера-Ламберта-Бера. В области подачи хладагента радиусом  $3$  мм задается теплоотдача с коэффициентом равным  $9000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной  $v = 10$  мм/с.

На рисунке 2 представлено распределение температур  $T$ (К) в процессе однолучевого термораскалывания (при использовании только излучения с длиной волны  $10,6$  мкм), а на рисунке 3 двухлучевого лазерного термораскалывания (при одновременном воздействии излучения с длинами волн  $10,6$  и  $5$  мкм) на поверхности пластины сапфира, вырезанной в плоскости (0001), т. е С-плоскости.

В таблице 1 приведены максимальные расчетные значения температур в исследуемых образцах толщиной  $h = 0,2$  мм,  $h = 0,4$  мм и  $h = 1$  мм при скорости обработки  $v = 10$  мм/с.

Таблица 1 – Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

Температура в обрабатываемой пластине вырезанной в плоскости (0001) Т, К	Толщина пластины $h$ и скорость обработки $v$		
	$h = 0,2$ мм	$h = 0,4$ мм	$h = 1$ мм
	$v = 10$ мм/с	$v = 10$ мм/с	$v = 10$ мм/с
двулучевое воздействие	1572	963	630,6
однолучевое воздействие	1511	935	619

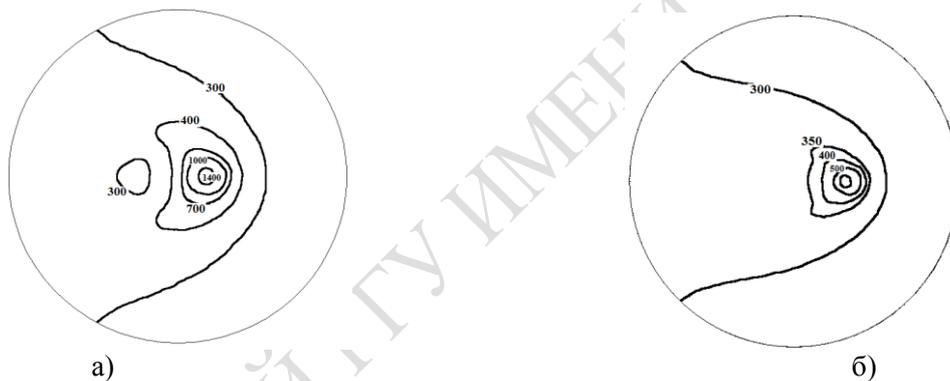


Рисунок 2 – Распределение температурных полей (К) на поверхности сапфировой пластины, вырезанной в плоскости (0001), т. е С-плоскости, при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной  $10,6$  мкм с учетом анизотропии тепловых свойств:

- а) – пластина толщиной  $0,2$  мм, скорость обработки  $v = 10$  мм/с;  
б) – пластина толщиной  $1$  мм, скорость обработки  $v = 10$  мм/с.

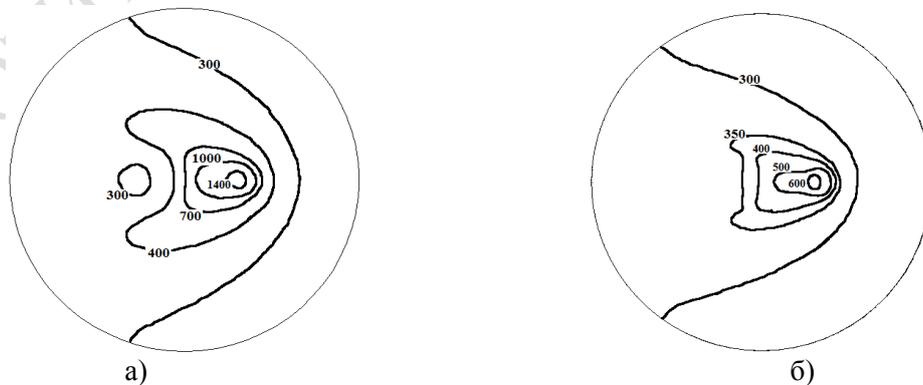


Рисунок 3 – Распределение температурных полей (К) на поверхности сапфировой пластины, вырезанной в плоскости (0001), т. е С-плоскости, при одновременном воздействии лазерного излучения с длиной волны равной  $10,6$  мкм и  $5$  мкм с учетом анизотропии тепловых свойств:

- а) – пластина толщиной  $0,2$  мм, скорость обработки  $v = 10$  мм/с;  
б) – пластина толщиной  $1$  мм, скорость обработки  $v = 10$  мм/с.

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, следует, что максимальные значения температуры для всех расчетных режимов не превышают температуру плавления сапфира (2303 К), что является необходимым условием для реализации хрупкого разрушения пластины под действием термоупругих напряжений. При этом, наибольшим значением температуры характеризуется режим обработки тонкой пластины ( $h = 0,2$  мм) с низкой скоростью ( $v = 10$  мм/с). Также необходимо отметить определяющее влияние большого значения коэффициента теплопроводности на формирование температурных полей при лазерном термораскалывании сапфировых пластин. Значение теплопроводности сапфира обуславливает значительное уменьшение максимума температур при обработке толстых образцов в сравнении с более тонкими. Данное изменение составляет порядка 38 % при сравнении резки образцов толщиной 0,2 и 0,4 мм и 59 % при сравнении резки образцов толщиной 0,2 и 1 мм.

Введение второго источника излучения, энергия которого поглощается по всей толщине образца, увеличивает максимальные значения температур в обрабатываемом материале по сравнению с однолучевым режимом обработки. Данное изменение для скорости обработки 10 мм/с составляет порядка 4 % для толщины пластины 0,2 мм, 3 % для толщины пластины 0,4 мм и 1,7 % для толщины пластины 1 мм при указанных ранее параметрах обработки. Уменьшение величины изменения максимальных температур в образце с увеличением толщины материала обусловлено тем, что поглощенное излучение в случае более толстых пластин более эффективно отводится с поверхности материала по толщине. При обработке на высоких скоростях изменение в величинах максимальных температур при использовании второго луча практически отсутствует.

Однако различие в пространственном распределении полей температур более существенное. Как видно из рисунка 4, в случае двулучевой обработки объемное поглощение энергии излучения приводит к более равномерному прогреву пластины по толщине вдоль линии воздействия лазерных лучей и хладагента.

Как известно, на величину и пространственное распределение напряжений кроме величины температур, существенное влияние имеет и их пространственное распределение. По полученным расчетным распределениям температурных полей выполнен расчет полей упругих напряжений. На рисунке 5 представлено распределение напряжений  $\sigma_{22}$  (МПа), действующих перпендикулярно линии обработки в процессе однолучевого, а на рисунке 6 двулучевого лазерного термораскалывания на поверхности пластины сапфира, вырезанной в плоскости (0001), т. е. С-плоскости.

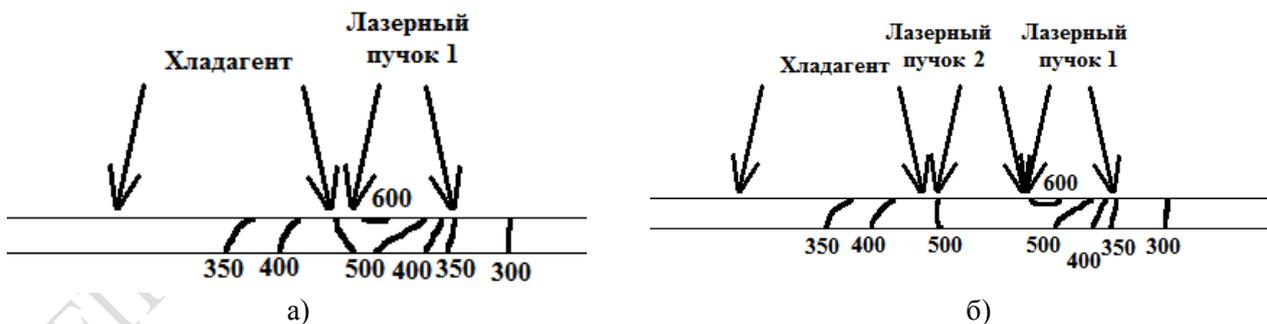


Рисунок 4 – Распределение температурных полей (К) по толщине материала вдоль линии обработки сапфировой пластины толщиной 1 мм, вырезанной в плоскости (0001), т. е. С-плоскости, при однолучевом а) и двулучевом б) лазерном термораскалывании и скорости обработки 10 мм/с

В таблице 2 приведены максимальные расчетные значения растягивающих напряжений в области воздействия хладагента в исследуемых образцах толщиной  $h = 0,2$  мм,  $h = 0,4$  мм и  $h = 1$  мм при скорости обработки  $v = 10$  мм/с.

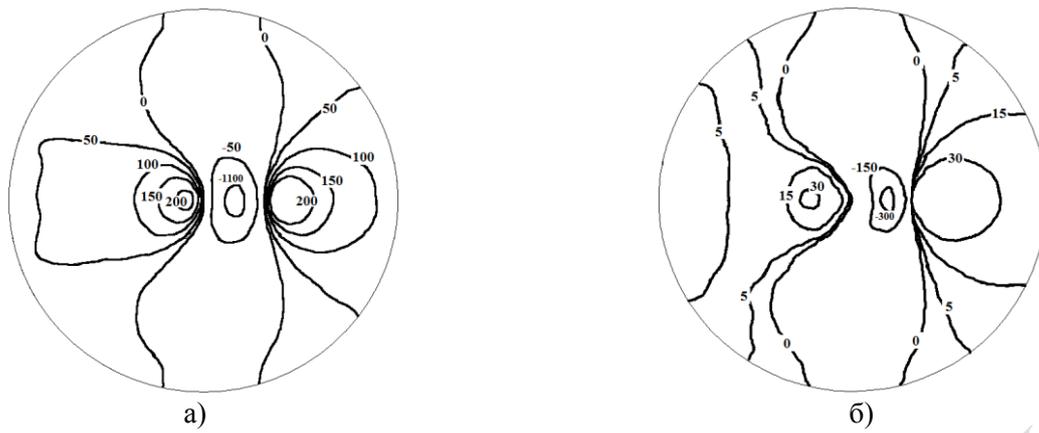


Рисунок 6 – Распределение полей температурных напряжений (МПа) на поверхности сапфировой пластины при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм с учетом анизотропии теплофизических свойств:

- а) – пластина толщиной 0,2 мм, скорость обработки  $v = 10$  мм/с;  
 б) – пластина толщиной 1 мм, скорость обработки  $v = 10$  мм/с.

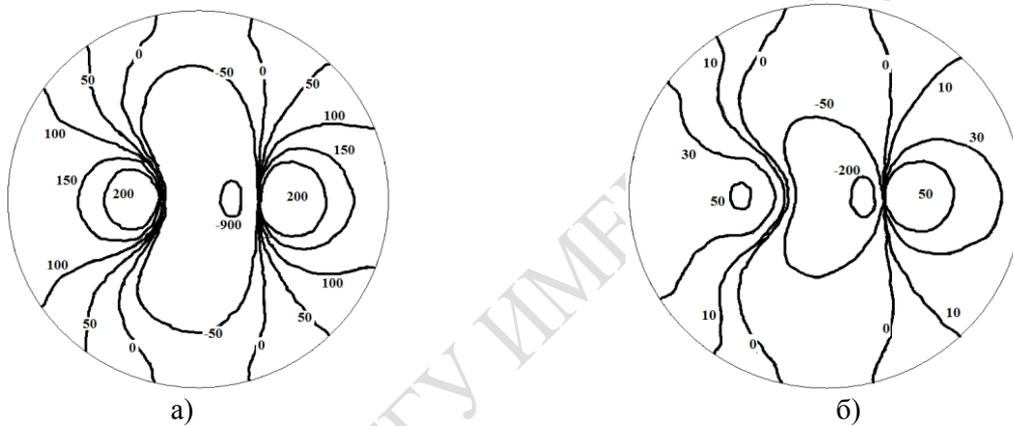


Рисунок 6 – Распределение полей температурных напряжений (МПа) на поверхности сапфировой пластины при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм и 5 мкм с учетом анизотропии теплофизических свойств:

- а) – пластина толщиной 0,2 мм, скорость обработки  $v = 10$  мм/с;  
 б) – пластина толщиной 1 мм, скорость обработки  $v = 10$  мм/с.

Таблица 2 – Расчетные значения максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_{22}$ (МПа) в обрабатываемой пластине

Максимальные растягивающие напряжения в обрабатываемой пластине, вырезанной в плоскости (0001) $\sigma_{22}$ , МПа	Толщина пластины $h$ и скорость обработки $v$		
	$h = 0,2$ мм $v = 10$ мм/с	$h = 0,4$ мм $v = 10$ мм/с	$h = 1$ мм $v = 10$ мм/с
двулучевое воздействие	284	131	52,9
однолучевое воздействие	235	95,8	31,3

Как видно из представленного распределения, в области воздействия лазерного излучения формируется зона значительных по величине сжимающих напряжений, а в области воздействия хладагента формируется область растягивающих напряжений, где и происходит развитие разделяющей трещины. Однако в случае двулучевого воздействия величина максимальных растягивающих напряжений, действующих перпендикулярно линии обработки выше, нежели в случае однолучевого воздействия.

Увеличение в области воздействия хладагента при двулучевом воздействии составляет 21 % в сравнении с однолучевым воздействием для пластины толщиной 0,2 мм и скорости обработки 10 мм/с; 36 % – для пластины толщиной 0,4 мм и 69 % – для пластины толщиной 1 мм для заданных плотностей мощности лазерных пучков. Следует отметить, что в работе [4] было показано, что в случае обработки кремниевых пластин на высоких скоростях значения

максимальных растягивающих напряжений в зоне перед лазерным пучком по величине оказывается несколько больше, нежели в области воздействия хладагента. В случае обработки сапфира такая картина наблюдается на любых скоростях обработки.

Аналогичные расчеты были выполнены режимов, когда максимальная температура на поверхности материала во всех случаях однолучевой обработки поддерживалась одинаковой 1511 К. Для этого плотность мощности источника излучения длиной волны 10,6 мкм варьировалась для достижения требуемой максимальной температуры на поверхности материала, а плотность мощности второго источника оставалась неизменной. В таблице 3 приведены максимальные расчетные значения растягивающих напряжений в области воздействия хладагента для данного случая в исследуемых образцах толщиной  $h = 0,2$  мм,  $h = 0,4$  мм и  $h = 1$  мм при скорости обработки  $v = 10$  мм/с.

Таблица 3 – Расчетные значения максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_{22}$ (МПа) в обрабатываемой пластине

Максимальные растягивающие напряжения в обрабатываемой пластине. вырезанной в плоскости (0001) $\sigma_{22}$ , МПа	Толщина пластины $h$ и скорость обработки $v$		
	$h = 0,2$ мм	$h = 0,4$ мм	$h = 1$ мм
	$v = 10$ мм/с	$v = 10$ мм/с	$v = 10$ мм/с
двулучевое воздействие	284	236	173
однолучевое воздействие	235	177	122

Увеличение в области воздействия хладагента при двулучевом воздействии в этом случае составляет 33 % в сравнении с однолучевым воздействием для пластины толщиной 0,4 мм и скорости обработки 10 мм/с; 41 % – для пластины толщиной 1 мм.

Увеличение растягивающих напряжений в области подачи хладагента по результатам расчетов происходит и на более высоких скоростях обработки.

Таким образом, использование дополнительного источника излучения с длиной волны, соответствующей объемному поглощению сапфиром, позволяет значительно увеличить величины максимальных растягивающих напряжений в области подачи хладагента при почти отсутствии увеличения температуры обрабатываемого материала. При этом наибольшее увеличение наблюдается при обработке более толстых пластин, где более равномерный прогрев пластины по толщине вдоль линии воздействия лазерных лучей и хладагента приводит к более эффективному формированию пространственного распределения термоупругих напряжений. Такое увеличение позволяет повысить эффективность зарождения и стабильность развития разделяющей трещины.

## Литература

1. Способ резки неметаллических материалов [Электронный ресурс] : патент №2024441 РФ / ФБГУ «Федеральный институт промышленной собственности». – Режим доступа: [http://www1.fips.ru/fips\\_serv1/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2024441&TypeFile=html](http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2024441&TypeFile=html). – Дата доступа: 19.10.2017.
2. Увеличение эффективности управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов / В.К. Сысоев [и др.] // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 2. – С. 65–69.
3. Двулучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалу-паев [и др.] // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.
4. Shalupaev, S.V. Features of controlled laser thermal cleavage of crystalline silicon / S.V. Shalupaev, A.N. Serdyukov, Y.V. Nikitjuk // CRYSTALLOGRAPHY REPORTS. – 2010. – Vol. 55, № 6. – P. 933–937.
5. Шалу-паев, С.В. Особенности процесса лазерного термораскалывания кристаллов с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой типа алмаза / С.В. Шалу-паев, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа // Проблемы взаимодействия излучения с веществом: IV Международная научная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения Б.В. Бокутя, Гомель, 9–11 ноября 2016 г. : в 2ч. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – Ч. 2. – С. 188–192.
6. Modeling of mechanical influence of double-beam laser on single-crystalline silicon / S.V. Shalupaev [et al.] // Archives of metallurgy and materials. – 2013. – Vol. 58, № 4. – P. 1381–1385.

7. Шалупаев, С.В. Моделирование процесса двулучевого асимметричного термораскалывания хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев, А.Н. Сердюков, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2011. – № 6 (69). – С. 124–127.
8. Шалупаев, С.В. Моделирование процесса двулучевого лазерного термораскалывания силикатных стекол в рамках линейной механики разрушения / С.В. Шалупаев, А.Н. Сердюков, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 2 (15). – С. 29–34.
9. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1983. – 212 с.
10. Коваленко, Л.Д. Основы термоупругости / Л.Д. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1970. – 307 с.
11. Карзов, Г.П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г.П. Карзов, Б.З. Марголин, В.А. Шевцова. – СПб. : Политехника, 1993. – 391 с.
12. Daniel, G. Harris Does anyone out there know the strength of sapphire? [Electronic resource] / G. Daniel. – Mode of access: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA421203>. – Date of access : 27.02.2017.
13. The effect of anisotropy on the deformation and fracture of sapphire wafers subjected to thermal shocks / T. Vodenitcharova [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 194. – P. 52–62.
14. Сапфир [Электронный ресурс] / Официальный сайт ООО «ТИДЕКС». – Режим доступа : <http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/Sapphire.pdf>. – Дата доступа : 30.07.2017.
15. Кристаллографические оси: Сапфировое стекло. Ориентация [Электронный ресурс] / Официальный сайт представителя компании ООО «Лори-Термо». – Режим доступа : <http://leucosapfir.ru/kristallograficheskie-osi>. – Дата доступа : 30.07.2017.
16. Свойства сапфира [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании «Монокристалл» – дочерней компании многоотраслевого промышленного холдинга «Концерн Энергомера». – Режим доступа : <http://www.monocrystal.com/ru/production/sapphire/properties>. – Дата доступа : 15.04.2017.

Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 27.09.2017