

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОДНОЛУЧЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ САПФИРА

Шалупаев С.В., Никитюк Ю.В., Серeda А.А.

*Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Гомель, Республика Беларусь, [Nikitjuk@gsu.by](mailto:Nikitjuk@gsu.by), [Sereda@gsu.by](mailto:Sereda@gsu.by)*

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 сапфировых 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.

Расчет термоупругих полей, формируемых в монокристаллической пластине из сапфира в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для трех различных вариантов: I – анализ резки без учета анизотропии тепловых и упругих свойств; II – анализ среза (0001) или С-плоскости с учетом анизотропии тепловых свойств; III – анализ среза (0001) или С-плоскости с учетом анизотропии тепловых и упругих свойств сапфира; IV – анализ среза (1102) или R-плоскости с учетом анизотропии упругих свойств сапфира.

С учетом кристаллографической структуры сапфира, когда пластина вырезана в С-плоскости (0001), матрица  $\{C_{ik}\}$  приобретет 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].

В случае, когда пластина вырезана в плоскости (1102), т.е. R-плоскости матрица приобретает вид:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} 128,3 & -7,7 & -7,67 & 0,072 & -6,13 & -6,16 \\ -7,7 & 130,15 & -7,76 & 4,5 & -0,6 & -1,38 \\ -7,67 & -7,76 & 130,13 & 4,5 & -1,38 & -0,58 \\ 0,072 & 4,5 & 4,5 & 34,47 & -4,8 & -4,8 \\ -6,13 & -0,6 & -1,38 & -4,8 & 33,6 & 4,78 \\ -6,16 & -1,38 & -0,58 & -4,8 & 4,78 & 33,6 \end{pmatrix}, \text{ ГПа.}$$

На рисунке 1 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки и формы их сечений. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 – хладагент, позицией 3 – пластина сапфира, позицией 5 и 4 отмечены, соответственно, сечения лазерного пучка 1 и зоны воздействия хладагента 2 на плоскости обработки. Горизонтальной стрелкой на рисунке 1 указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

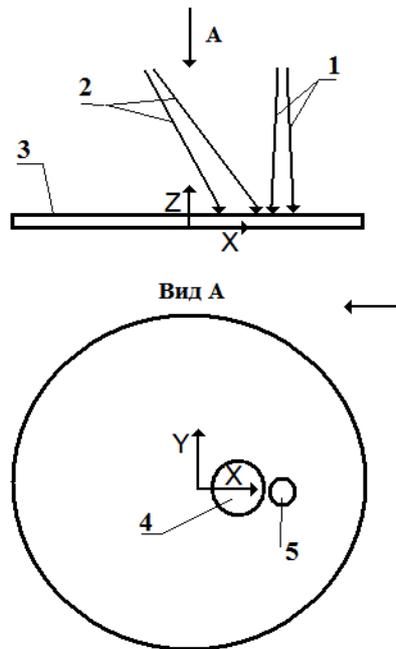


Рисунок 1 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки

Расчеты были выполнены для дисков радиусом 15,5 мм и толщиной  $h=0,2$  мм,  $h=0,4$  мм и  $h=1$  мм. Радиус пятна лазерного излучения  $R=1,5$  мм, плотность мощности излучения  $6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. 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 и  $v=100$  мм/с. В качестве источника излучения использован лазер с длиной волны 10,6 мкм, энергия которого эффективно поглощается в поверхностных слоях. Теплофизические свойства сапфира для расчетов взяты из источников [12-16].

Для сравнительного анализа выполнены расчеты температурных и термоупругих полей в пластинах сапфира в процессе лазерного термораскалывания без учета анизотропии тепловых и упругих свойств.

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 и  $v=100$  мм/с.

Таблица 1 – Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

Температура в обрабатываемой пластине Т, К	лазерное излучение с длиной волны 10,6 мкм					
	h=0,2 мм		h=0,4 мм		h=1 мм	
	v=10 мм/с	v=100 мм/с	v=10 мм/с	v=100 мм/с	v=10 мм/с	v=100 мм/с
для изотропной пластины	1509	535	932	437	613	405
для пластины вырезанной в плоскости (0001)	1511	536	935	440	619	409
для пластины вырезанной в плоскости (1102)	1780	500	1025	417	607	390

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.

На рисунках 2–4 представлено распределение полей температурных напряжений (МПа) на поверхности сапфировой пластины для вариантов обработки I, III и IV при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм.

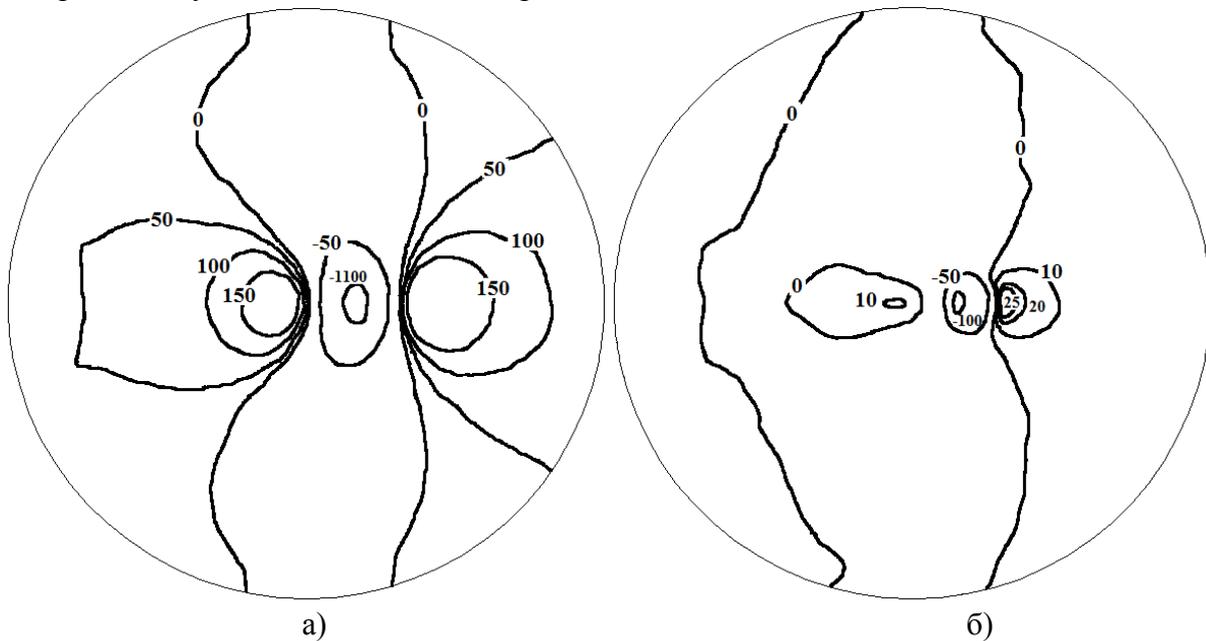


Рисунок 2 – Распределение полей температурных напряжений (МПа) на поверхности сапфировой пластины для варианта обработки I:

- а) – пластина толщиной 0,2 мм, скорость обработки  $v=10$  мм/с;
- б) – пластина толщиной 1 мм, скорость обработки  $v=100$  мм/с.

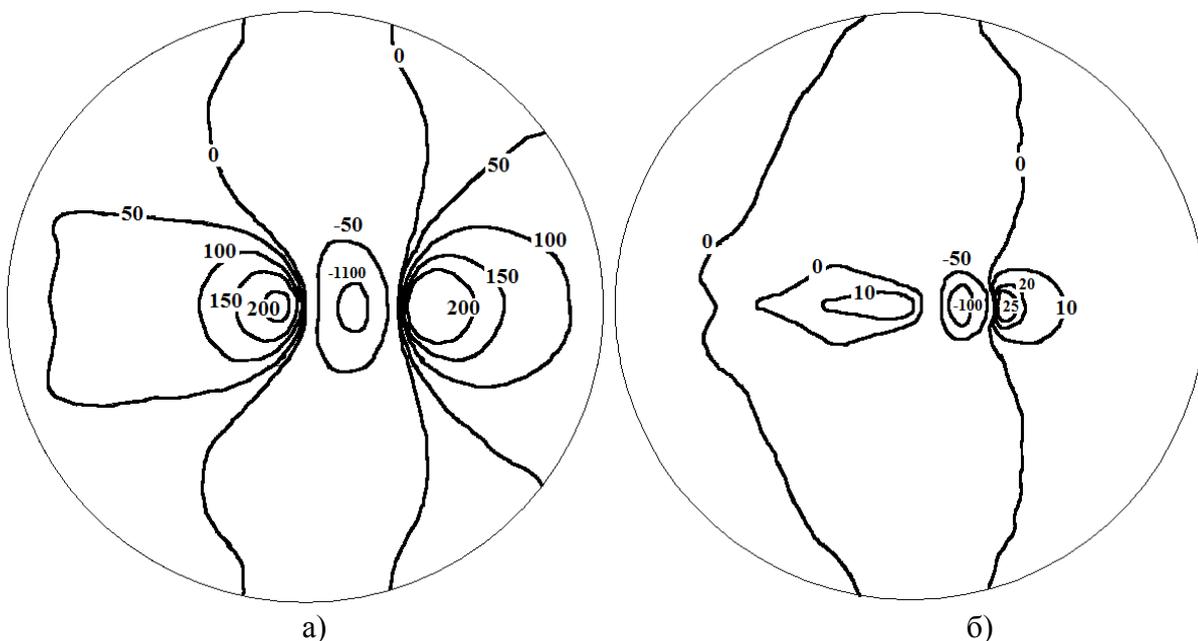


Рисунок 3 – Распределение полей температурных напряжений (МПа) на поверхности сапфировой пластины для варианта обработки III:

- а) – пластина толщиной 0,2 мм, скорость обработки  $v=10$  мм/с;
- б) – пластина толщиной 1 мм, скорость обработки  $v=100$  мм/с.

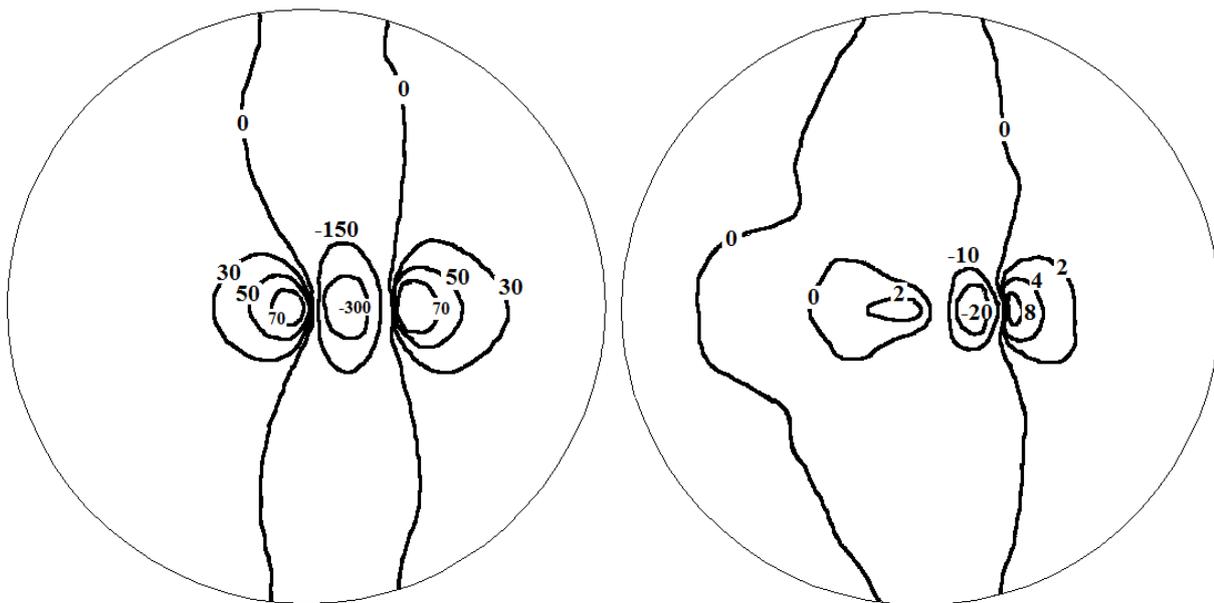


Рисунок 4 – Распределение полей температурных напряжений (МПа) на поверхности сапфировой пластины для варианта обработки IV:

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

б) – пластина толщиной 1 мм, скорость обработки  $v=100$  мм/с.

В таблице 2 приведены расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения, формируемые в зоне обработки при управляемом лазерном термораскалывании, для четырех различных вариантов I – анализ резки без учета анизотропии тепловых и упругих свойств; II – анализ среза (0001) или С-плоскости с учетом анизотропии тепловых свойств; III – анализ среза (0001) или С-плоскости с учетом анизотропии тепловых и упругих свойств сапфира; IV – анализ среза (1102) или R-плоскости с учетом анизотропии упругих свойств сапфира.

Таблица 2 – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения (МПа) в зоне обработки при однолучевом лазерном воздействии с длиной волны 10,6 мкм

Вариант	h=0,2 мм		h=0,4 мм		h=1 мм	
	v=10 мм/с	v=100 мм/с	v=10 мм/с	v=100 мм/с	v=10 мм/с	v=100 мм/с
I	282	88,8	152	56,9	80,4	36,3
II	282	89	153	57,9	81,6	37
III	310	97,6	164	62,1	85,5	37,8
IV	106	25,7	52,5	16,7	28,8	11,3

Анализ данных, приведенных в таблице 1 и 2, позволяет установить, что учет анизотропии теплопроводности сапфира для среза в плоскости С практически не влияет на максимальные значения температур в пластине, однако изменение в пространственном распределении температурных полей оказывает влияние на распределение и максимальных значений термоупругих напряжений. Максимум растягивающих напряжений наблюдается для режима III. При этом их величина превышает предел прочности сапфира, что показывает возможность реализации процесса управляемого лазерного термораскалывания. Разница в величинах растягивающих напряжений между режимами I и III составляет от 5 до 10% в зависимости от скорости обработки и толщины пластин. Следует также отметить, что в варианте обработки IV отмечается значительное уменьшение величин термоупругих напряжений по сравнению с режимом III при аналогичных температурных полях. При обработке пластины вырезанной в плоскости R (1102) величины максимальных растягивающих напряжений в плоскости перпендикулярной линии обработки меньше на 65–75 % в зависимости от скорости обработки и толщины пластин нежели в случае обработки пластин вырезанных в плоскости С (0001). Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о необходи-

мости учета анизотропии упругих свойств пластин из сапфира при моделировании процессов лазерного термораскалывания. Указанная разница в величинах напряжений должна быть учтена при выборе параметров процесса разделения (например, за счет изменения скорости резки или мощности лазерного излучения).

### Литература:

1. Пат. 2024441 Рос. Федерация, МПК<sup>5</sup> С 03 В 33/02 №5030537/33. Способ резки неметаллических материалов / Кондратенко В.С. – заявл. 02.04.92; опубл. 15.12.94.
2. Сысоев, В.К. Увеличение эффективности управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов / В.К. Сысоев, Б.П. Папченко, П.А. Вятлев [и др.] // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 2. – С. 65 – 69.
3. Шалупаев, С.В. Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк [и др.] // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 5. – С. 62 – 66.
4. Shalupaev, S.V. Features of controlled laser thermal cleavage of crystalline silicon / A.N. Serdyukov, S.V. Shalupaev, Y. V. Nikitjuk // CRYSTALLOGRAPHY REPORTS. –2010. – Vol. 55, No. 6. – pp. 933–937.
5. Шалупаев, С.В. Особенности процесса лазерного термораскалывания кристаллов с кубической гранцентрированной кристаллической решеткой типа алмаза / Шалупаев С.В., Никитюк Ю.В., Середа А.А. // IV Международная научная конференция “Проблемы взаимодействия излучения с веществом” посвященная 90-летию со дня рождения Б.В. Бокутя 9-11 ноября 2016 г. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. –Ч.2. – С. 188–192.
6. Shalupaev, S.V. Modeling of mechanical influence of double-beam laser on single-crystalline silicon / S.V. Shalupaev, A.N. Serdyukov, G.S. Y.V. Nikitjuk [et al.] // Archives of metallurgy and materials. – 2013. – Vol. 58, №4. – P. 1381-1385.
7. Шалупаев, С.В. Моделирование процесса двухлучевого асимметричного термораскалывания хрупких неметаллических материалов / Сердюков А.Н., Шалупаев С.В., Никитюк Ю.В., Середа А.А. // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2011. – №6(69). – С. 124-127.
8. Шалупаев, С.В. Моделирование процесса двухлучевого лазерного термораскалывания силикатных стекол в рамках линейной механики разрушения / С.В. Шалупаев, А.Н. Сердюков, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа // 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? [Электронный ресурс] / Официальный сайт «DEFENSE TECHNICAL INFORMATION CENTER» – URL:<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA421203>– Дата доступа: 27.02.2017.
13. Vodenitcharova, T. The effect of anisotropy on the deformation and fracture of sapphire wafers subjected to thermal shocks / T. Vodenitcharova, L.C. Zhanga, I. Zarudia [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 194. – P. 52-62.
14. Сапфир [Электронный ресурс] / Официальный сайт ООО «ТИДЕКС» – URL: <http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/Sapphire.pdf> – Дата доступа: 30.03.2017.
15. Кристаллографические оси: Сапфировое стекло. Ориентация [Электронный ресурс] / Официальный сайт представителя компании ООО «Лори-Термо» – URL: <http://leycosapfir.ru/kristallograficheskie-osi> – Дата доступа: 30.03.2017.

16. Свойства сапфира [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании «Монокристалл» – дочерней компании многоотраслевого промышленного холдинга «Концерн Энергомера» – URL: <http://www.monocrystal.com/ru/production/sapphire/properties> – Дата доступа: 15.04.2017.