

УДК 621.37/.39:621.9.048.7

Особенности лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов

Е.Б. ШЕРШНЕВ, Ю.В. НИКИТЮК, С.И. СОКОЛОВ, А.Е. ШЕРШНЕВ

Выполнен расчет термоупругих полей, формируемых в кристаллах кварца АТ- и ВТ- срезов в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента. Полученные результаты могут быть использованы в электронной промышленности для оптимизации процесса лазерной резки кристаллов кварца.

Ключевые слова: трещина, лазерное раскалывание, кварцевая пластина.

Calculation of the thermoelastic fields formed in crystals of quartz AT - and BT - cuts as a result of consecutive laser heating and coolant influence is executed. The received results can be used in electronic industry for optimisation of process laser are sharp quartz crystals.

Keywords: crack, laser splitting, quartz plate.

Введение. Лазерное раскалывание является одним из наиболее эффективных методов высокоточной обработки хрупких неметаллических материалов [1]. В работах [2]–[5] были выполнены исследования основных особенностей применения данного метода для обработки изотропных хрупких неметаллических материалов. В последнее время большое внимание уделяется изучению лазерного раскалывания различных кристаллов (например [6], [7]), в том числе кристаллов кварца [8]–[10]. Актуальность данного направления исследований обусловлена существенными недостатками традиционных способов разделения кристаллов, к которым относятся значительные потери обрабатываемого материала и загрязнение рабочих поверхностей. В работе [10] авторами данной статьи были проведены исследования особенностей процесса лазерного раскалывания кристаллического кварца с учетом анизотропии его свойств. Однако моделирование в [10] было выполнено лишь для стандартных первоначальных ориентаций кристаллических образцов. При этом на практике наиболее широко применяются кристаллы кварца АТ- и ВТ-срезов [11]. В связи с этим в данной работе было выполнено исследование особенностей процесса лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов.

1. Моделирование процесса лазерного раскалывания. Расчет полей термоупругих напряжений, формируемых в кварцевых пластинах при лазерном раскалывании, был выполнен с использованием метода конечных элементов в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [12]–[13].

Расчеты проводились для квадратных пластин с геометрическими размерами $20 \times 20 \times 1,5$ мм и $20 \times 20 \times 0,75$ мм. Моделирование проводилось для случая воздействия лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм. Радиус пятна лазерного излучения – $R = 1,5$ мм, мощность излучения – $P = 50$ Вт. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной $v = 5$ мм/с и $v = 15$ мм/с.

На рисунке 1 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки при перемещении лазерного пучка. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 – хладагент, позицией 3 – лазерно-индуцированная трещина, позицией 4 – кварцевая пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

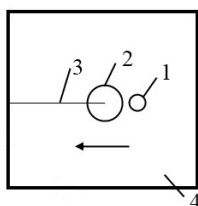


Рисунок 1 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки кристалла кварца

При расчетах плотность и удельная теплоемкость кристаллического кварца полагались соответственно равными $\rho = 2643 \text{ кг/м}^3$ и $C = 741 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$. В ходе моделирования учитывались различия физических свойств кристаллического кварца в различных кристаллографических направлениях. Коэффициенты теплопроводности и линейного термического расширения кристаллического кварца полагались соответственно равными $\lambda_{\parallel} = 12,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\alpha_{\parallel} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ вдоль оси симметрии третьего порядка Z и $\lambda_{\perp} = 6,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\alpha_{\perp} = 14,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ – перпендикулярно оси Z [14], [15].

Низкотемпературный кварц принадлежит к тригональной системе, вследствие чего его упругие свойства описываются шестью независимыми компонентами тензора модулей упругости. Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости: $C_{11} = 86,75 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{12} = 5,95 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{13} = 11,91 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{14} = -17,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{33} = 107,2 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{44} = 57,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$ [16], [17].

Любое расположение кристаллического элемента относительно осей X , Y , Z может быть получено путем ряда последовательных поворотов одной из первоначальных ориентаций этого кристаллического элемента. В случае АТ-среза выполняется поворот на 35° , а в случае ВТ-среза выполняется поворот на 49° [18] (см. рисунок 2).

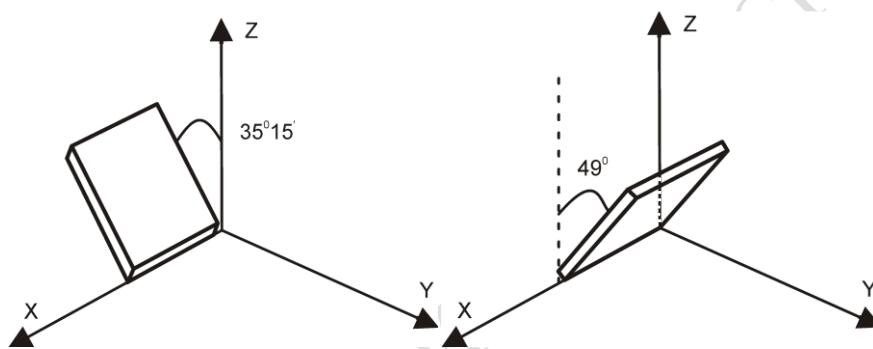


Рисунок 2 – АТ- и ВТ-срезы кристаллического кварца

Матрица $\{C_{ik}\}$ для АТ среза может быть записана в следующем виде

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} 86,74 & -8,25 & 27,15 & -3,66 & 0 & 0 \\ -8,25 & 129,77 & -7,42 & 5,70 & 0 & 0 \\ 27,15 & -7,42 & 102,83 & 9,92 & 0 & 0 \\ -3,66 & 5,70 & 9,92 & 38,61 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 68,78 & 2,57 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,57 & 28,96 \end{pmatrix} \cdot 10^9 \text{ Па}, \quad (1)$$

Соответственно для ВТ среза матрица $\{C_{ik}\}$ имеет вид

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} 86,74 & 27,53 & -8,63 & 0,057 & 0 & 0 \\ 27,53 & 98,24 & -5,67 & -12,80 & 0 & 0 \\ -8,63 & -5,67 & 130,86 & 0,17 & 0 & 0 \\ 0,057 & -12,80 & 0,17 & 40,36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 29,87 & -6,49 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6,49 & 67,87 \end{pmatrix} \cdot 10^9 \text{ Па}, \quad (2)$$

Расчет термоупругих полей, формируемых в кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для четырех различных вариантов: I – анализ АТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении параллельном оси X; II – анализ АТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении перпендикулярном оси X; III – анализ ВТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении параллельном оси X; IV – анализ ВТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении перпендикулярном оси X.

2. Результаты расчетов. Результаты проведенных расчетов приведены в таблицах 1–2 и на рисунках 3–4. В таблице 1 содержатся значения максимальных температур, формируемые в кварцевой пластине для четырех исследуемых вариантов обработки. Расчетные значения максимальных по величине термоупругих напряжений растяжения и сжатия, содержатся в таблице 2. На рисунках 3–4 представлены распределения температурных полей и полей температурных напряжений для пластин толщиной $h=0,75$ мм, обрабатываемых со скоростью $v=5$ мм/с.

Таблица 1 – Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

Вариант	Максимальная температура в обрабатываемой пластине T, К			
	$h=0,75$ мм		$h=1,5$ мм	
	$v=5$ мм/с	$v=15$ мм/с	$v=5$ мм/с	$v=15$ мм/с
I	1520	994	1125	842
II	1538	1005	1136	847
III	1502	999	1135	862
IV	1531	1018	1156	871

Таблица 2 – Расчетные максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки, МПа	$h=0,75$ мм		$h=1,5$ мм	
		$v=5$ мм/с	$v=15$ мм/с	$v=5$ мм/с	$v=15$ мм/с
I	сжатия	650	343	431	281
	растяжения	85	33	45	22
II	сжатия	717	381	483	319
	растяжения	100	40	53	34
III	сжатия	605	322	401	264
	растяжения	77	27	42	19
IV	сжатия	563	316	395	272
	растяжения	74	31	50	30

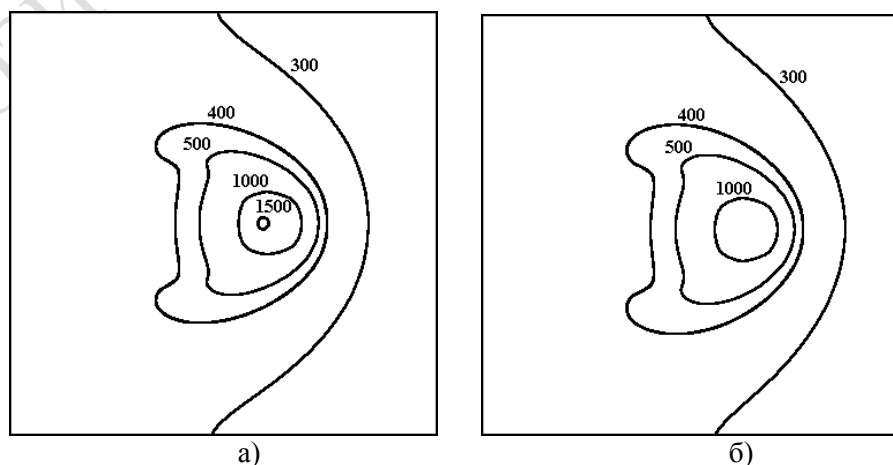


Рисунок 3 – Распределение температурных полей на поверхности кристаллического кварца: а) вариант I; б) вариант III

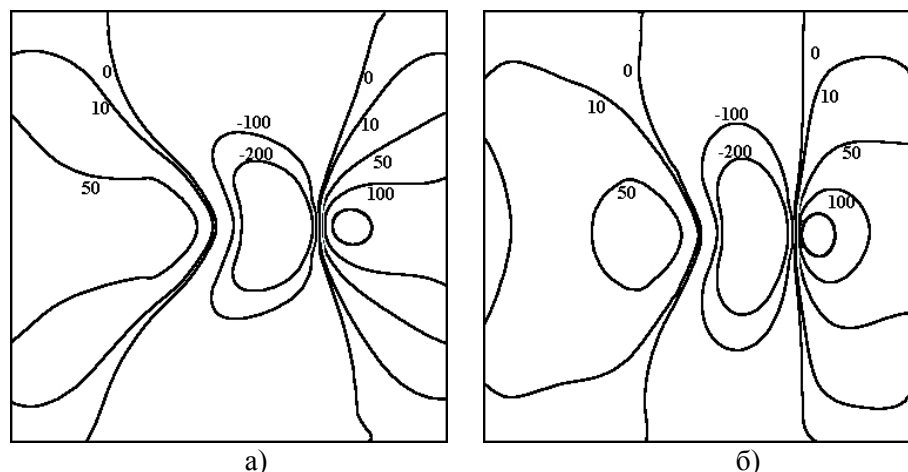


Рисунок 3 – Распределение полей термоупругих напряжений на поверхности кристаллического кварца: а) вариант I; б) вариант III

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что анизотропия свойств кристаллов кварца в случае обработки АТ- и ВТ-срезов не оказывает существенного влияния на максимальные значения температуры в зоне обработки. Значительно более важными факторами оказываются такие параметры, как скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины. Так, различия, обусловленные анизотропией теплофизических свойств приводят к разнице в максимальных значениях температуры, не превышающей 3 %, а различия, обусловленные скоростью обработки и геометрией образца для выбранных расчетных параметров, достигают 45 %. Из анализа значений данных, приведенных в таблице 2, следует, что скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины так же оказывают существенное влияние на значения термоупругих напряжений, формируемых в зоне обработки. Различия, обусловленные этими факторами, приводят к разнице в максимальных значениях растягивающих напряжений порядка 50–80 %. При этом и анизотропия свойств кристаллов кварца оказывает существенное влияние на максимальные значения термоупругих напряжений в зоне обработки. Так, соответствующие различия для максимальных значений растягивающих напряжений превышают 35 %. Данная разница в величинах растягивающих напряжений должна быть учтена при выборе параметров процесса лазерного раскалывания.

Заключение. Полученные результаты показывают необходимость учета анизотропии свойств кристаллов кварца при выборе параметров лазерного раскалывания кварцевых пластин АТ- и ВТ-срезов.

Литература

1. Способ резки неметаллических материалов : пат. 2024441 РФ, МКИ 5 C03B33/02 / В.С. Кондратенко ; заявитель В.С. Кондратенко ; заявл. 04.02.92; опубл. 12.15.94.
2. Шалупаев, С.В. The Analysis of Laser Thermosplitting of Fragile Materials by Using of Special Geometry Beams / С.В. Шалупаев [и др.] // *Ceramics. Polish ceramic bulletin.* – 2001. – Vol. 65. – P. 75.
3. Сысоев, В.К. Увеличение эффективности управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов / В.К. Сысоев [и др.] // *Оптический журнал.* – 2004. – Т. 71., № 2. – С. 65.
4. Tsai, C. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique / С. Tsai, Н. Chen // *Journal of materials processing technology.* – 2003. – Vol. 136. – P. 166.
5. Шалупаев, С.В. Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа // *Оптический журнал.* – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.
6. Наумов, А.С. Разработка технологии разделения приборных пластин на кристаллы : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.14 / А.С. Наумов ; МГУПИ. – М., 2009. – 19 с.
7. Сердюков, А.Н. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния / А.Н. Сердюков, С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк // *Кристаллография.* – 2010. – Т. 55, № 6. – С. 1180–1184.

8. Способ резки хрупких неметаллических материалов : пат. 2224648 РФ, МКИ5 СОЗ В 33/02 В.С. Кондратенко, П.Д. Гидин ; заявитель Кондратенко В.С., Гидин П.Д. ; заявл. 03.09.2002 ; опубл. 27.02.2004.
9. Гиндин, П.Д. Разработка новых технологий и оборудования на основе метода лазерного управляемого термораскалывания для обработки деталей приборостроения, микро- и оптоэлектроники : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.11.14 / П.Д. Гиндин ; МГУПИ. – М., 2009. – 43 с.
10. Сердюков, А.Н., Шершнев, Е.Б., Никитюк, Ю.В., Шолох, В.Ф., Соколов, С.И. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца // Кристаллография. – 2012. – Т. 57, № 6. – С. 906–912.
11. Kestler, W., Jung, W., Bryant, J. О подборе кварцевых резонаторов // Основы схемотехники. – 2001. – № 5. – С. 19.
12. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1983. – 212 с.
13. Коваленко, Л.Д. Основы термоупругости / Л.Д. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1970. – 307 с.
14. Блистанов, А.А., Бондаренко, В.С., Чкалова, В.В. Акустические кристаллы / А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, В.В. Чкалова. – М. : Наука, 1982. – 632 с.
15. Корицкий, Ю.В., Пасынков, В.В., Тареев, Б.М. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат. 1988. – Т. 3. – 728 с.
16. Heyliger, P., Ledbetter, H., Kim, S. / P. Heyliger, H. Ledbetter, S. Kim // J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – V. 114, № 2. – P. 644.
17. Смагин, А.Г., Ярославский, М.И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А.Г. Смагин, М.И. Ярославский. – М. : Энергия, 1970. – 488 с.
18. Глюкман, Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы : 3-е изд., перераб. и доп / Л.И. Глюкман. – М. : Радио и связь, 1981. – 232 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 14.11.2014