

**Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, В.Ф. Шолох, С.И. Соколов**

**УО «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», Беларусь**

## **ЛАЗЕРНОЕ УПРАВЛЯЕМОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КВАРЦА**

Широкое использование кристаллического кварца в современной электронной промышленности [1] выводит на первый план задачи, связанные с поиском эффективных технологий его обработки. Одной из таких задач является задача разделения монокристаллов кварца на пластинки заданных размеров. Используемые для ее решения механические способы резки кристаллических материалов, технология применения которых, как правило, требует учета анизотропии только упругих свойств материала, обладают рядом недостатков: невысокая точность, низкое качество поверхностей разделения, необходимость дополнительной обработки поверхностей среза. В связи с этим в последнее время для разделения монокристаллов кварца на пластинки заданных размеров применяется лазерное термораскалывание [2]. Однако задачи лазерного термораскалывания требуют принципиального учета не только анизотропии упругих свойств материала, но и анизотропии его тепловых свойств.

Как известно, кристаллический кварц обладает сильно выраженной анизотропией тепловых и упругих свойств. Так, коэффициент линейного термического расширения вдоль оси симметрии третьего порядка и в направлениях, перпендикулярных ей, отличаются в 1,6 раза. Аналогичное отношение коэффициентов теплопроводности равно 1,8 [3]. Существенное отличие указанных параметров приводит к тому, что при разделении кристаллического кварца в различных направлениях методом лазерного термораскалывания необходимо осуществлять дифференцированный нагрев, обеспечивающий формирование термоупругих напряжений, необходимых для образования лазерно-индуцированной трещины. Так как при лазерном термораскалывании определяющее влияние на формирование лазерно-индуцированной трещины оказывают напряжения, действующие перпендикулярно плоскости разделения, а величина этих

напряжений пропорциональна линейному коэффициенту термического расширения в том же направлении, то при формировании трещины в плоскости  $XZ$  необходимо рассматривать напряжения  $\sigma_y$ , при формировании трещины в плоскости  $XY$  необходимо рассматривать напряжения  $\sigma_z$ , при формировании трещины в плоскости  $ZY$  необходимо рассматривать напряжения  $\sigma_x$  (см. рисунок 1). На рисунке 1 ось  $Z$  параллельна оси симметрии третьего порядка  $C$ .

Величина термоупругих напряжений, возникающих при изменении температуры в твердом теле, прямо пропорциональна произведению соответствующего коэффициента линейного термического расширения на величину изменения температуры. В свою очередь максимальные значения температуры в зоне лазерной обработки  $T_{\max}$  обратно пропорциональны теплопроводности материала. При этом, в случае реализации лазерного термораскалывания таких анизотропных материалов, как кристаллический кварц, наиболее существенный вклад в изменение  $T_{\max}$  оказывает величина коэффициента теплопроводности в направлении, перпендикулярном плоскости обработки. Таким образом, при формировании трещины перпендикулярной плоскости  $YZ$  необходимо учитывать коэффициент теплопроводности  $\lambda_x$ , при формировании трещины перпендикулярной плоскости  $XY$  необходимо учитывать коэффициент теплопроводности  $\lambda_z$ , при формировании трещины перпендикулярной плоскости  $XZ$  необходимо учитывать коэффициент теплопроводности  $\lambda_y$  (см. рисунок 1).

Максимальные значения температуры в зоне лазерной обработки  $T_{\max}$  обратно пропорциональны скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала  $v$  и прямо пропорциональны мощности лазерного излучения  $P$ .

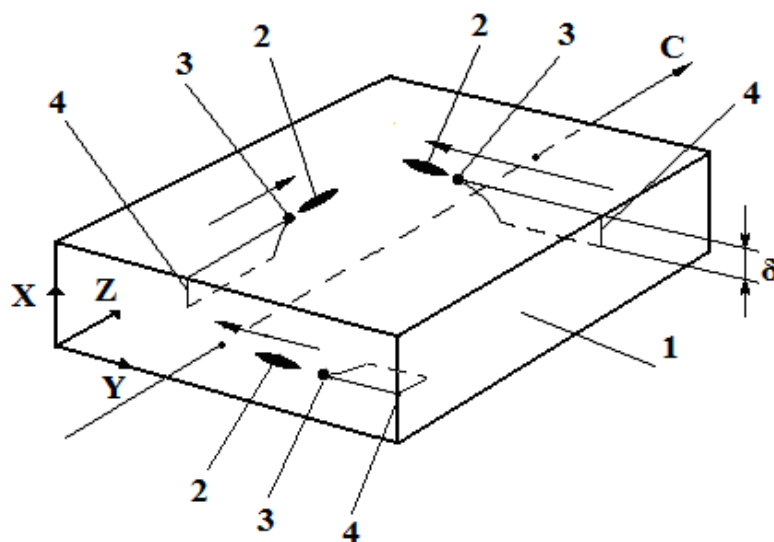


Рисунок 1 – Схема формирования лазерно-индуцированной трещины в кристаллическом кварце: 1 – материал; 2 – зона нагрева; 3 – зона охлаждения; 4 – трещина

Таким образом, для оценки технологических параметров лазерного термораскалывания можно использовать простые соотношения, приведенные для трех основных вариантов резки:

1) случай лазерного термораскалывания кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости параллельной оси симметрии третьего порядка:

$$\frac{v}{P} = k \cdot \frac{\alpha_y}{\lambda_x} = k \cdot \frac{\alpha_+}{\lambda_+}, \quad (1)$$

2) случай лазерного термораскалывания кристаллического кварца перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости параллельной оси симметрии третьего порядка:

$$\frac{v}{P} = k \cdot \frac{\alpha_z}{\lambda_x} = k \cdot \frac{\alpha_{\parallel}}{\lambda_+}, \quad (2)$$

3) случай лазерного термораскалывания кристаллического кварца перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости перпендикулярной оси симметрии третьего порядка:

$$\frac{v}{P} = k \cdot \frac{\alpha_x}{\lambda_z} = k \cdot \frac{\alpha_+}{\lambda_{\parallel}}. \quad (3)$$

Коэффициенты линейного термического расширения и теплопроводности кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка и перпендикулярно ей:  $\alpha_{\parallel} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_+ = 14,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и  $\lambda_{\parallel} = 12,3 \text{ Вт/мК}$ ,  $\lambda_+ = 6,8 \text{ Вт/мК}$  [3].

Для проверки предложенных соотношений были проведены расчеты методом конечных элементов для трех перечисленных выше случаев обработки кристаллического кварца. При расчетах использовались следующие параметры лазерного термораскалывания: мощность лазерного излучения – 30 Вт; радиус лазерного пятна – 1,5 мм; скорость относительного перемещения лазерного пучка и материала – 15 мм/с. Результаты численных расчетов показали, что при выбранных расчетных параметрах максимальные растягивающие напряжения равнялись: 86,8 МПа в случае 1), 46,1 МПа в случае 2) и 55,5 МПа в случае 3).

Таким образом, при мощности лазерного излучения равной 30 Вт при скорости  $v=15$  мм/с в первом случае будет формироваться лазер-

но-индуцированная трещина. Для реализации процесса лазерного термораскалывания во втором и в третьем случае скорость  $v$  должна равняться 8,7 мм/с и 7,9 мм/с соответственно.

Были проведены экспериментальные исследования процессов лазерного термораскалывания кристаллов кварца. В качестве материала использовались пластины кристаллического кварца размерами 20x10x1,5 мм. Мощность лазерного излучения составляла 30 Вт, пучок был сфокусирован в виде круглого пятна радиусом 1,5 мм. В качестве средства перемещения был использован двухкоординатный стол с ходом перемещения 500x500 мм, обеспечивающий скорость перемещения в диапазоне от 0 до 100 мм/с. Для резки был использован CO<sub>2</sub> – лазер с длиной волны излучения 10,6 мкм и с регулируемой мощностью от 0 до 80 Вт.

Результаты эксперимента отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты лазерного термораскалывания кристаллического кварца

V, мм/с Ориен- тация реза	6		15	
	1			
2		Нет реза		
3		Нет реза		

В соответствии с полученными экспериментальными данными при одинаковых параметрах обработки лазерное термораскалывание более устойчиво протекает в случае, когда линия реза лежит в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка, что находится в хорошем соответствии с результатами численного моделирования и подтверждает справедливость предлагаемых критериев.

### Литература

1. Справочник по кварцевым резонаторам / под ред. П.Г. Позднякова. – М.: Связь, 1978. – С. 3.
2. Гиндин, П.Д. Математическая модель термораскалывания хрупких анизотропных материалов / П.Д. Гиндин // Поверхность. – 2010. – № 1. – С. 14–18.

3.Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – С. 581–583.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф.СКОРИНЫ