

УДК 621.37/.39:621.9.048.7

*Посвящается памяти Б.Н. Гречушникова***ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

© 2010 г. А. Н. Сердюков, С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк

*Гомельский государственный университет, Беларусь**E-mail: shalupaev@gsu.by*

Поступила в редакцию 09.06.2010 г.

Выполнено численное моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния. Трехмерный анализ термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кремниевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для трех различных вариантов анизотропии. Моделирование проводилось для случаев воздействия лазерного излучения с длинами волн, равными 1.06 и 0.808 мкм. Проведена экспериментальная проверка полученных результатов с использованием твердотельного лазера на алюмоиттриевом гранате. Полученные результаты могут быть использованы в электронной промышленности для оптимизации процесса прецизионного разделения приборных пластин на кристаллы.

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 [1]. К основным преимуществам управляемого лазерного термораскалывания относятся высокая точность разделения и высокая скорость обработки, его безотходность. Исследование особенностей применения этого метода для обработки стекол и керамики было выполнено в [2–5].

Особый интерес представляют публикации, появившиеся в последнее время и посвященные изучению управляемого лазерного термораскалывания различных кристаллов (например, [6]). Однако нужно отметить, что в этих работах численное моделирование термоупругих полей выполнено в двумерной постановке задачи и без учета анизотропии упругих свойств кристаллов. В то же время известно, что динамика протекания различных физических процессов даже в кубических кристаллах может качественно измениться по сравнению с изотропными средами [7, 8]. В связи с этим представляется целесообразным проведение трехмерного моделирования процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния, относящего к кубической системе, с учетом его анизотропии.

Для моделирования процессов лазерного термораскалывания пластин кремния был использован метод конечных элементов [9]. При моделировании управляемого лазерного термораскалывания на первом этапе выполнялся расчет полей температур, а затем решалась задача о наличии термоупругих напряжений, формируемых в результате воздействия лазерного излучения и хладагента на кремний. 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.

Для расчетов плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и коэффициент линейного термического расширения кремния полагаются соответственно равными  $\rho = 2330 \text{ кг/м}^3$ ,  $C = 758 \text{ Дж/кг К}$ ,  $\lambda = 109 \text{ Вт/м К}$ ,  $\alpha = 2.33 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  [12, 13].

Расчет термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кремниевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для трех различных вариантов: I – трехмерный анализ изотропной пластины, II – трехмерный анализ анизотропной пластины, вырезанной в плоскости (100), III – трехмерный анализ анизотропной пластины, вырезанной в плоскости (111).

Закон Гука для анизотропных материалов может быть записан в матричной форме [14, 15]:

$$\sigma_i = \sum C_{ik}(\varepsilon_k - \varepsilon_k^t), \quad (1)$$

где

$$\sigma_1 = \sigma_{xx}, \quad \sigma_2 = \sigma_{yy}, \quad \sigma_3 = \sigma_{zz}, \quad \sigma_4 = \sigma_{xy}, \quad (2)$$

$$\sigma_5 = \sigma_{yz}, \quad \sigma_6 = \sigma_{xz}, \quad \text{напряжения}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{xx}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{yy}, \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_{zz}, \quad \varepsilon_4 = 2\varepsilon_{xy}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_5 = 2\varepsilon_{yz}, \quad \varepsilon_6 = 2\varepsilon_{xz}, \quad \text{упругие деформации –}$$

$$\varepsilon_1^t = \alpha_x \Delta T, \quad \varepsilon_2^t = \alpha_y \Delta T, \quad \varepsilon_3^t = \alpha_z \Delta T, \\ \varepsilon_4^t = 0, \quad \varepsilon_5^t = 0, \quad \varepsilon_6^t = 0 \quad \text{температурные дефор-} \quad (4)$$

мации. Для кубических кристаллов, если направления действующих сил, приводящих к растягивающим и сдвиговым напряжениям, совместить с основными кристаллографическими направлениями  $\langle 100 \rangle$ , то матрица  $\{C_{ik}\}$  приобретет вид [14]:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица  $\{C_{ik}\}$  для случая, когда пластина вырезана в плоскости  $\langle 111 \rangle$  может быть записана в следующем виде [15]:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} - \frac{m}{2} & C_{12} + \frac{m}{6} & C_{12} + \frac{m}{3} & 0 & 0 & -\frac{m}{3\sqrt{2}} \\ C_{12} + \frac{m}{6} & C_{11} - \frac{m}{2} & C_{12} + \frac{m}{3} & 0 & 0 & \frac{m}{3\sqrt{2}} \\ C_{12} + \frac{m}{3} & C_{12} + \frac{m}{3} & C_{11} - \frac{2m}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} + \frac{m}{6} & \frac{m}{3\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{m}{3\sqrt{2}} & C_{44} + \frac{m}{3} & 0 \\ -\frac{m}{3\sqrt{2}} & \frac{m}{3\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & C_{44} + \frac{m}{3} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где

$$m = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}. \quad (7)$$

Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости:  $C_{11} = 1.656 \times 10^5$ ,  $C_{12} = 0.6386 \times 10^5$ ,  $C_{44} = 0.7953 \times 10^5$  МПа [16].

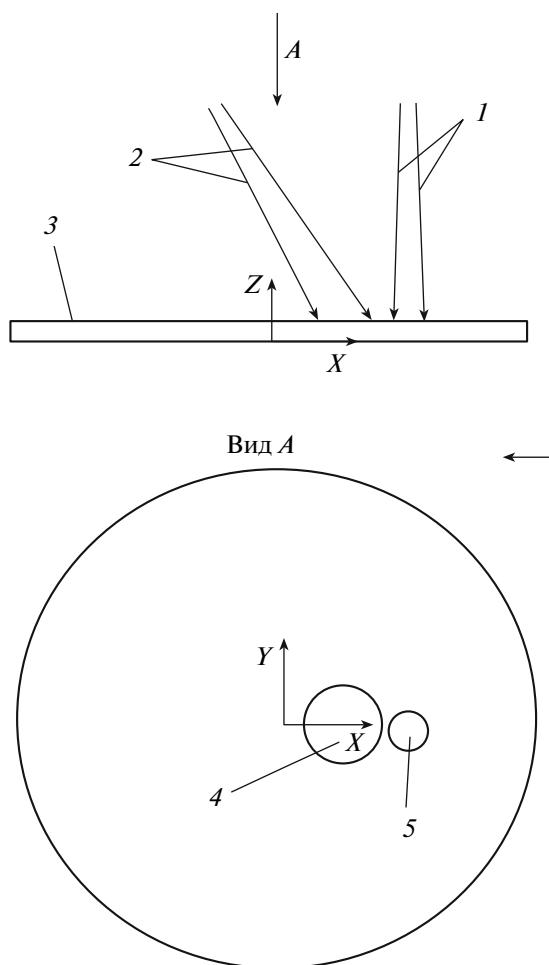
Для моделирования управляемого лазерного термораскалывания изотропной пластины кремния в соответствии с [15] считалось, что модуль Юнга  $E = 1.9 \times 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.42$  (вариант Ia). Кроме этого, были использованы модуль Юнга и коэффициент Пуассона, определенные по следующим формулам (вариант Ib):  $E = 1/S_{11}$ ,  $\nu = -S_{12}/S_{11}$ , где  $S_{11}$  и  $S_{12}$  – коэффициенты матрицы податливости, соответственно равные  $7.68 \times 10^{-3}$  и  $-2.14 \times 10^{-3}$  ГПа<sup>-1</sup> [14].

На рис. 1 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки и формы их сечений. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направ-

ление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

Расчеты проводились для дисков радиусом 15.5 мм и толщиной  $h = 0.2$  и  $0.4$  мм. Радиус пятна лазерного излучения  $R = 0.5$  мм, мощность излучения  $P = 60$  Вт. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной 10 и 100 мм/с. Отметим, что не существует принципиальной сложности для проведения расчетов термоупругих полей, формируемых в образцах других типоразмеров, а также для других скоростей обработки и мощности лазерного излучения.

Моделирование проводилось для случаев воздействия лазерного излучения с длинами волн 1.06 и 0.808 мкм. Выбор для проведения численного моделирования лазерного излучения с длиной волны, равной 1.06 мкм, обусловлен необходимостью проведения экспериментальной проверки результатов численного моделирования. Использование для численных расчетов парамет-



**Рис. 1.** Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки: 1 – лазерный пучок, 2 – хладагент, 3 – кремниевая пластина, 4 – сечения зоны воздействия хладагента на плоскости обработки, 5 – сечения лазерного пучка на плоскости обработки.

ров лазерного излучения с длиной волны 0.808 мкм представляло интерес, так как кремний достаточно интенсивно поглощает излучение с данной длиной волны, и в настоящее время уже существуют лазерные излучатели достаточной мощности для реализации процесса управляемого лазерного термораскалывания. Кроме этого,

нужно отметить, что экспериментальные исследования процессов разделения кремниевых пластин на кристаллы в [6] осуществлялись при помощи установки, в состав которой входил лазер, генерирующий излучение на данной длине волны.

Как уже отмечалось, для проведения сравнительного анализа расчеты выполнены для трех различных вариантов (изотропная пластина, пластина, вырезанная в плоскости (100), и пластина, вырезанная в плоскости (111)).

Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 1 и 2 и на рис. 2 и 3. Из анализа данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 2, следует, что максимальные значения температуры для всех расчетных режимов не превышают температуру плавления кремния, 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) для излучения с длиной волны 0.808 мкм. Также нужно отметить определяющее влияние большого значения коэффициента теплопроводности на формирование температурных полей при лазерном термораскалывании кремниевых пластин. Значение теплопроводности кремния обуславливает значительное уменьшение максимума температур при обработке толстых образцов в сравнении с более тонкими при использовании излучения с длиной волны 0.808 мкм. Данное изменение составляет порядка 30% при сравнении резки образцов толщиной 0.2 и 0.4 мм. Нужно отметить, что при использовании в качестве технологического инструмента излучения с длиной волны 1.06 мкм данный эффект выражен слабо, что обусловлено объемным характером поглощения данного излучения кристаллическим кремнием.

Также большое значение коэффициента теплопроводности кремния оказывает существенное влияние на пространственное распределение температурных полей при различных скоростях обработки (рис. 2).

В табл. 2 приведены расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения

**Таблица 1.** Расчетные значения максимальных и минимальных температур в обрабатываемой пластине для скоростей перемещения образца  $v = 10$  и  $100$  мм/с

Температура в обрабатываемой пластине $T, K$	Лазерное излучение с длиной волны 1.06 мкм				Лазерное излучения с длиной волны 0.808 мкм			
	$h = 0.2$ мм		$h = 0.4$ мм		$h = 0.2$ мм		$h = 0.4$ мм	
	$v = 10$	$v = 100$	$v = 10$	$v = 100$	$v = 10$	$v = 100$	$v = 10$	$v = 100$
Максимальная	507	427	508	419	1640	1154	1095	804
Минимальная	297	293	304	293	320	293	331	293

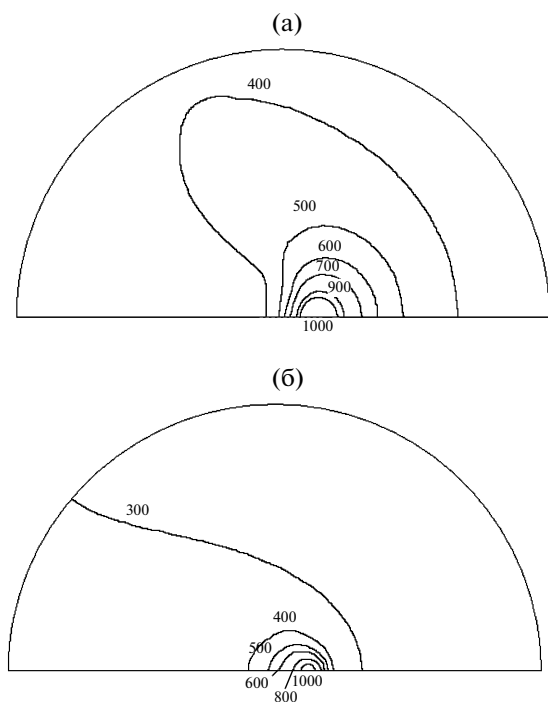


Рис. 2. Распределение температурных полей на поверхности кремниевой пластины, вырезанной в плоскости (111), К: а –  $v = 10$  мм/с, б –  $v = 100$  мм/с.

и сжатия, формируемые в зоне обработки при управляемом лазерном термораскалывании для трех различных вариантов: I – трехмерный анализ изотропной пластины (Ia – по данным [13], Ib – по данным [14]), II – трехмерный анализ анизотропной пластины, вырезанной в плоскости (100), III – трехмерный анализ анизотропной пластины, вырезанной в плоскости (111). Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать вывод, что использование изотропной модели

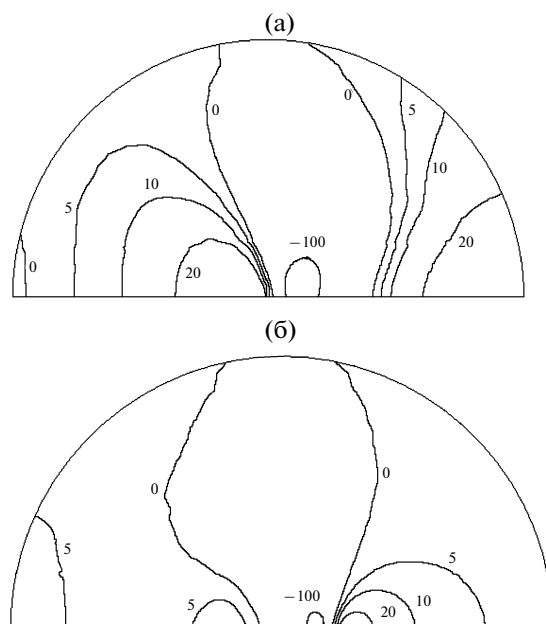
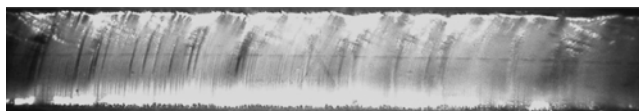


Рис. 3. Распределение полей температурных напряжений на поверхности кремниевой пластины, вырезанной в плоскости (111), МПа: а –  $v = 10$  мм/с, б –  $v = 100$  мм/с.

процесса управляемого лазерного термораскалывания таких анизотропных материалов, как кремний, приводит к существенным погрешностям. Так, при сравнении максимальных растягивающих напряжений, формируемых в зоне обработки пластины, вырезанной в плоскости (100), видно, что использование изотропной модели дает погрешность, достигающую 48 и 16% для вариантов Ia и Ib соответственно. В случае моделирования обработки пластины, вырезанной в плоскости (111), эти погрешности достигают 39 и 20% для вариантов Ia и Ib соответственно.

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

Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки $\sigma_y$ , МПа	Лазерное излучение с длиной волны 1.06 мкм				Лазерное излучение с длиной волны 0.808 мкм			
		$h = 0.2$ мм		$h = 0.4$ мм		$h = 0.2$ мм		$h = 0.4$ 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	$v = 10$ мм/с	$v = 100$ мм/с
I a	растяжения	8.2	1.7 (5.4)	7.3	0.9 (5.9)	49.7	10.0 (33.1)	24.0	2.9 (20.2)
	сжатия	-46.4	-27.9	-45.8	-26.1	-296	-178	-172	-102
I b	растяжения	5.6	1.2 (3.7)	5.0	0.6 (4.0)	33.8	6.8 (22.6)	16.4	2.0 (13.8)
	сжатия	-31.7	-19.1	-31.4	-17.8	199	-122	-118	-69.5
II	растяжения	6.3	1.3 (4.2)	5.6	0.7 (4.6)	38.5	7.9 (26.0)	18.6	2.0 (16.1)
	сжатия	-36.1	-21.3	-35.6	-19.6	-223	-135	-129	-75.1
III	растяжения	6.7	1.4 (4.4)	5.8	0.6 (4.8)	40.4	8.1 (27.4)	19.4	2.2 (16.8)
	сжатия	-38.7	-22.7	-38.0	-20.8	-240	-143	-139	-80.1



**Рис. 4.** Вид торца кремниевой пластины, разделенной методом управляемого лазерного термораскалывания.

Кроме этого, нужно отметить, что разница в величинах максимальных растягивающих напряжений, формируемых в пластинах, вырезанных в плоскостях (100) и (111), составляет от 3 до 10%, что находится в хорошем соответствии с результатами [15]. Указанная разница в величинах напряжений должна быть учтена при выборе параметров процесса разделения (например, за счет изменения скорости резки или мощности лазерного излучения).

Отдельно нужно обратить внимание на особенности пространственной локализации термоупругих полей при управляемом лазерном термораскалывании на высоких скоростях. Так, при резке на скорости 100 мм/с перед зоной сжимающих напряжений в месте воздействия лазерного излучения формируется зона растягивающих напряжений (рис. 3), которые по величине в несколько раз превышают значения растягивающих напряжений в зоне воздействия хладагента. Значения этих напряжений приведены в круглых скобках в табл. 2.

Для проверки результатов численного моделирования были проведены экспериментальные исследования с использованием лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм. На рис. 4 представлен вид торца кремниевой пластины, разделенной методом управляемого лазерного термораскалывания. Результаты экспериментов показали адекватность используемой методики моделирования.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости учета анизотропии упругих свойств приборных пластин из кремния при моделировании процессов лазерного термораскалывания. Результаты моделирования могут быть использованы в электронной про-

мышленности для оптимизации процесса прецизионного разделения приборных пластин на кристаллы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кондратенко В.С.* Способ резки неметаллических материалов // Решение на выдачу патента РФ по заявке № 2024441.
2. *Шалунаев С.В., Шершнев Е.Б., Сердюков А.Н. и др.* // *Ceramics. Polish ceramic bulletin.* 2001. V. 65. P. 75.
3. *Сысоев В.К., Папченко Б.П., Захарченко А.В. и др.* // *Опт. журн.* 2004. Т. 71. № 2. С. 65.
4. *Tsai C., Chen H.* // *J. Mater. Proc. Technol.* 2003. V. 136. P. 166.
5. *Шалунаев С.В., Шершнев Е.Б., Никитюк Ю.В. и др.* // *Опт. журн.* 2005. Т. 73. № 5. С. 62.
6. *Наумов А.С.* Разработка технологии разделения приборных пластин на кристаллы. Дис.... канд. техн. наук. М.: МГУПИ, 2007.
7. *Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокуть Б.В., Валяшко Е.Г.* Оптические свойства кристаллов. Минск.: Навука і тэхніка, 1995. 302 с.
8. *Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.* Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1975. 680 с.
9. *Шабров Н.Н.* Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983. 212 с.
10. *Коваленко Л.Д.* Основы термоупругости. Киев: Наук. думка, 1970. 307 с.
11. *Карзов Г.П.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.
12. *Фалкевич Э.С., Пульнер Э.О., Червонный И.Ф. и др.* Технология полупроводникового кремния. М.: Металлургия, 1992. 408 с.
13. *Корицкий Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М.* Справочник по электротехническим материалам. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 728 с.
14. *Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А.* Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
15. *Lackner T.* // *J. Electron. Mater.* 1989. V. 18. P. 19.
16. *Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Чкалова В.В.* Акустические кристаллы. М.: Наука, 1982. 632 с.