

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО РАСКАЛЫВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН, ВЫРЕЗАННЫХ В ПЛОСКОСТИ (110)**А.Н. Сердюков, С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda***Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель***PROCESS RESEARCH OF LASER SPLITTING SILICON WAFERS CUTOUT IN THE PLANE (110)****A.N. Serdykov, S.V. Shalupaev, Y.V. Nikitjuk, A.A. Sereda***F. Scorina Gomel State University, Gomel*

Представлены результаты моделирования процесса лазерного термораскалывания монокристаллического кремния. Расчет термоупругих полей, формируемых в кремниевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для среза (110) в трех различных вариантах перемещений лазерного пучка, а именно в направлениях [1–10], [001], [1–11].

Ключевые слова: трещина, лазерное раскалывание, кремниевая пластина.

Results of laser thermosplitting process modelling of single-crystalline silicon are presented. Calculation of the thermoelastic fields formed in a silicon plate as a result of consecutive laser heating and coolant influence was carried out for a section (110) in three different variants of laser beam movement, namely in directions [1–10], [001], [1–11].

Keywords: crack, laser splitting, silicon wafer.

Введение

Лазерное термораскалывание является одним из высокоэффективных способов размерной обработки многих хрупких неметаллических материалов, в частности, таких, как стекло, керамика и кремний. Используемая в настоящее время технология разделения кремниевых пластин алмазным инструментом обладает существенным недостатком – наличием дефектной зоны вдоль линии обработки [1]. При этом технология лазерного термораскалывания имеет ряд преимуществ, к которым в первую очередь относится высокое качество обработки.

Исследованию особенностей применения лазерного термораскалывания для обработки стекол и керамики посвящены работы [2]–[6]. В работах [1], [7] проведено исследование лазерного термораскалывания кристаллического кремния, однако численное моделирование термоупругих полей в этих работах было выполнено в двумерной постановке задачи и без учета анизотропии упругих свойств кристаллов. В работе [8] авторами данной статьи было выполнено численное моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния в трехмерной постановке и с учетом анизотропии упругих свойств материала. На основании выполненных расчетов было показано, что использование изотропной модели процесса лазерного термораскалывания монокристаллов кремния приводит к существенным погрешностям. Таким образом, при выборе технологических параметров процесса формирования

лазерно-индуцированных трещин принципиально важно учитывать анизотропию упругих свойств обрабатываемого материала.

Расчет термоупругих полей в работе [8] был осуществлен для пластин, вырезанных в плоскостях (100) и (111), при этом на практике также используются монокристаллы кремния, вырезанные в плоскости (110) [9]. В связи с этим в данной работе выполнено моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания пластин монокристаллического кремния, вырезанного в плоскости (110).

1 Моделирование процесса лазерного термораскалывания

Моделирование процесса лазерного термораскалывания пластин кремния было осуществлено в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке с использованием метода конечных элементов [10]. В качестве критерия, определяющего направление развития лазерно-индуцированной трещины, был использован критерий максимальных растягивающих напряжений [11].

Плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и коэффициент линейного термического расширения кремния полагались равными $\rho=2330 \text{ кг/м}^3$, $c=758 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $\lambda=10^9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\alpha=2,33\cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ [9], [12].

Расчет термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кремниевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева

и воздействия хладагента, осуществлялся для трех различных вариантов: I – анализ среза (110), при перемещении лазерного пучка в направлении [1–10]; II – анализ среза (110), при перемещении лазерного пучка в направлении [001]; III – анализ среза (110), при перемещении лазерного пучка в направлении [1–11].

Закон Гука для анизотропных материалов может быть записан в матричной форме [13], [14]

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^6 C_{ik} (\varepsilon_k - \varepsilon_k^t),$$

где напряжения

$$\sigma_1 = \sigma_{xx}, \quad \sigma_2 = \sigma_{yy}, \quad \sigma_3 = \sigma_{zz},$$

$$\sigma_4 = \sigma_{yz}, \quad \sigma_5 = \sigma_{zx}, \quad \sigma_6 = \sigma_{xy};$$

упругие деформации

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{xx}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{yy}, \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_{zz},$$

$$\varepsilon_4 = 2\varepsilon_{yz}, \quad \varepsilon_5 = 2\varepsilon_{zx}, \quad \varepsilon_6 = 2\varepsilon_{xy};$$

температурные деформации

$$\varepsilon_1^t = \alpha_x \Delta T, \quad \varepsilon_2^t = \alpha_y \Delta T, \quad \varepsilon_3^t = \alpha_z \Delta T,$$

$$\varepsilon_4^t = 0, \quad \varepsilon_5^t = 0, \quad \varepsilon_6^t = 0.$$

Для кубических кристаллов матрица $\{C_{ik}\}$ в случае, когда пластина вырезана в плоскости (100), может быть записана в следующем виде [15]

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix}$$

Матрица $\{C_{ik}\}$ для среза (110) может быть записана в следующем виде

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} \frac{C_{11} + C_{12}}{2} + C_{44} & \frac{C_{11} + C_{12}}{2} - C_{44} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{C_{11} + C_{12}}{2} - C_{44} & \frac{C_{11} + C_{12}}{2} + C_{44} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{pmatrix}.$$

2 Результаты расчетов

Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости: $C_{11}=1,656 \cdot 10^5$ МПа, $C_{12}=0,6386 \cdot 10^5$ МПа, $C_{44}=0,7953 \cdot 10^5$ МПа [15].

На рисунке 2.1 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 – хладагент, позицией 3 – лазерно-индуцированная микротрещина, позицией 4 – кремниевая пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

Расчеты были выполнены для дисков радиусом 15,5 мм и толщиной $h=0,2$ мм и $h=0,4$ мм. Радиус пятна лазерного излучения $R=0,5$ мм, мощность излучения $P=60$ Вт. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной $v=10$ мм/с и $v=100$ мм/с. Моделирование проводилось для случаев воздействия лазерного излучения с длинами волн равными 1,06 мкм и 0,808 мкм.

Результаты проведенных расчетов приведены в таблице 2.1 и на рисунках 2.2–2.4. В таблице 2.1 содержатся расчетные значения максимальных по величине термоупругих напряжений растяжения и сжатия, формируемых в

кремниевой пластине для трех исследуемых вариантов обработки. На рисунках 2.2–2.4 представлены распределения полей температурных напряжений для пластин толщиной $h=0,2$ мм, обрабатываемых со скоростью $v=10$ мм/с, при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 0,808 мкм.

Отметим, что вследствие отсутствия у кристаллов кремния анизотропии теплопроводности расчетные значения температур в зоне обработки и закономерности их формирования для срезов (110), (100) и (111) совпадают при выборе одинаковых параметров обработки и размеров обрабатываемых пластин [8].

Анализ данных, приведенных в таблице 2.1, показывает, что наибольших значений напряжения растяжения достигают при термораскалывании среза (110) при перемещении лазерного пучка в направлении [001] (II вариант обработки), а наименьших при перемещении лазерного пучка в направлении [1–10] (I вариант обработки). При этом разница в величинах максимальных растягивающих напряжений, формируемых при обработке в направлениях [001] и [1–10], составляет от 11% до 28%. Данная разница в величинах растягивающих напряжений должна быть учтена при выборе параметров процесса лазерного термораскалывания.

Таблица 2.1 – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки, 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	растяжения	7,9	1,6	6,9	0,8	48,1	9,8	23,2	2,6
	сжатия	-43,4	-25,4	-40,3	-21,0	-273	-164	-153	-89,3
II	растяжения	9,3	2,0	7,8	1,1	57,3	12,1	26,1	3,6
	сжатия	-49,1	-28,5	-42,6	-22,1	-309	-185	-163	-94,6
III	растяжения	8,5	1,7	7,3	0,9	52,2	10,3	24,5	2,9
	сжатия	-46,8	-27,0	-41,7	-21,5	-294	-175	-158	-92,0

Отдельно отметим особенности пространственной локализации термоупругих полей, формируемых при лазерном термораскалывании среза (110) в направлении [1-11] (рисунок 2.4).

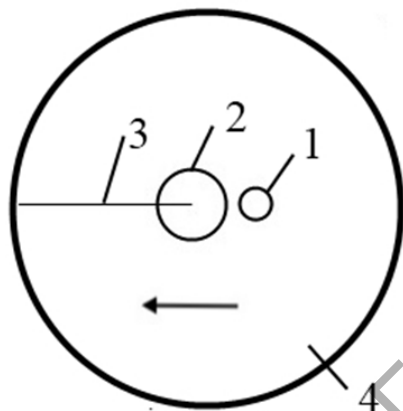


Рисунок 2.1 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки монокристаллической кремниевой пластины

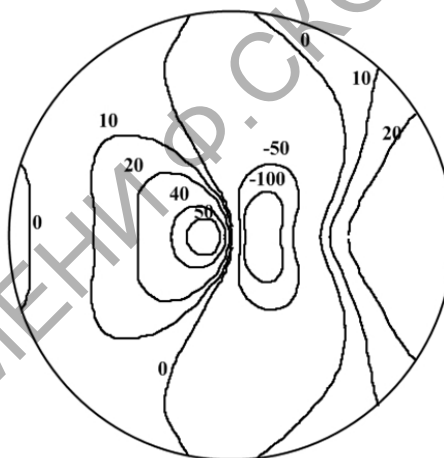


Рисунок 2.3 – Распределение полей температурных напряжений на поверхности кремниевой пластины, при перемещении лазерного пучка в направлении [001], МПа

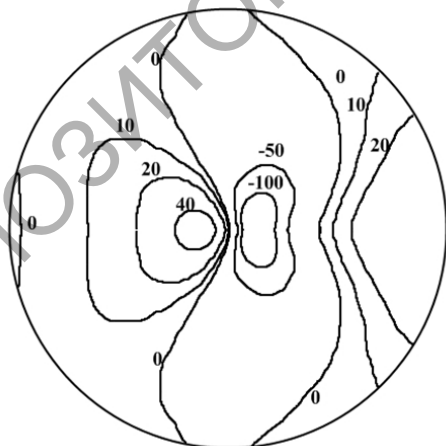


Рисунок 2.2 – Распределение полей температурных напряжений на поверхности кремниевой пластины, при перемещении лазерного пучка в направлении [1-10], МПа

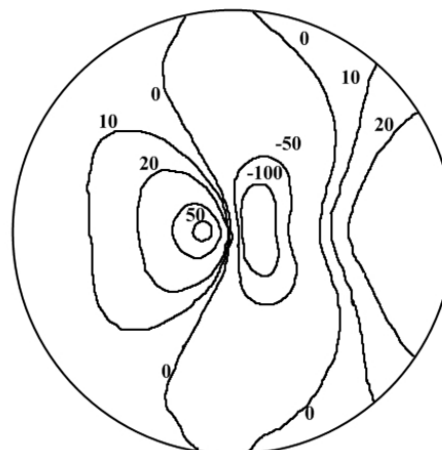


Рисунок 2.4 – Распределение полей температурных напряжений на поверхности кремниевой пластины, при перемещении лазерного пучка в направлении [1-11], МПа

Распределение термоупругих полей, формируемых при этом режиме обработки, характеризуется небольшой асимметричностью относительно линии воздействия лазерного излучения.

Указанная асимметричность полей термоупругих напряжений обусловлена асимметричностью сечения поверхности модулей Юнга относительно направления [1–11] (см. [13]) и должна быть принята во внимание при выборе параметров термораскалывания.

Заключение

Полученные результаты показывают необходимость учета анизотропии упругих свойств кремния при выборе параметров лазерного термораскалывания в различных направлениях монокристаллических пластин, вырезанных в плоскости (110).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла / Г. А. Мачулка. – М. : Сов. радио, 1979. – 136 с.
3. Способ резки неметаллических материалов: пат. 2024441 РФ, МКИ 5 С03В33/02 / В.С. Кондратенко; заявитель В.С. Кондратенко; заявл. 04.02.92; опубл. 12.15.94
4. Увеличение эффективности управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов / В.К. Сысоев [и др.] // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 2. – С. 65–69.
5. Junke, J. Cutting glass substrates with dual-laser beams / J. Junke, W. Xinbing // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47. – P. 860–864.
6. Двудуговое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев [и др.] // Оптический журнал. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.

7. 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.

8. 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.

9. Технология полупроводникового кремния / Э.С. Фалкевич [и др.]. – М. : Металлургия, 1992. – 408 с.

10. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1983. – 212 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. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий [и др.]. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

13. Концевой, Ю.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фаттахов. – М. : Радио и связь, 1982. – 240 с.

14. Lackner, T. Determination of axisymmetric elastic constants in anisotropic silicon for a thyristor tablet / T. Lackner // Journal of electronic materials. – 1989. – Vol. 18. – P. 19–24.

15. Акустические кристаллы / А.А. Блистанов [и др.] ; под общ. ред. М.П. Шаскольской. – М. : Наука, 1982. – 632 с.

Поступила в редакцию 05.06.12.