

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО РАСКАЛЫВАНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ИЗ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ И СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖЕК

Ю.В. Никитюк

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF LASER SPLITTING OF TWO-LAYER STRUCTURES OF SILICON PLATES AND GLASS SUBSTRATES

Y.V. Nikitjuk

F. Scorina Gomel State University

В работе выполнено численное моделирование процесса лазерного раскалывания двухслойных структур из монокристаллического кремния и стекла при воздействии на обрабатываемое изделие лазерных пучков с длинами волн равными 1,06 мкм и 10,6 мкм и хладагента. Расчет термоупругих полей, формируемых в двухслойной пластине в результате лазерного нагрева, осуществлялся для трех срезов кристаллов кремния: (100), (110), (111). Анализ полученных результатов был проведен как для случая обработки со стороны стеклянного слоя, так и для случая обработки со стороны монокристаллического кремния. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при оптимизации процесса прецизионного разделения двухслойных структур из монокристаллического кремния и стекла.

Ключевые слова: трещина, лазерное раскалывание, кремниевая пластина.

In this work, a numerical simulation of the process of laser splitting of two-layer structures made of monocrystalline silicon and glass is carried out when the workpiece is exposed to laser beams with wavelengths equal to 1.06 μm and 10.6 μm and a refrigerant. The calculation of thermoelastic fields formed in a two-layer plate as a result of laser heating was carried out for three sections of silicon crystals: (100), (110), (111). The analysis of the results obtained was carried out both for the case of processing from the side of the glass layer, and for the case of processing from the side of monocrystalline silicon. The results obtained in this work can be used to optimize the process of precision separation of two-layer structures made of monocrystalline silicon and glass.

Keywords: crack, laser splitting, silicon plate.

Введение

Основными методами разделения приборных пластин на кристаллы являются: резка с помощью алмазных дисков, механическое и лазерное скрайбирование [1]–[2]. Еще одним эффективным способом прецизионной резки ряда хрупких неметаллических материалов, в том числе таких, как силикатные стекла и монокристаллический кремний, является лазерное раскалывание [1]–[5].

В ряде случаев успешная реализация технологий лазерного раскалывания кремниевых пластин и изделий из стекла обеспечивалась применением двулучевых методов обработки [6]–[9]. При этом использование таких технологий особенно эффективно при обработке структур, состоящих из различных материалов [10].

Использование двухслойных структур из монокристаллического кремния и стекла получило широкое распространение при изготовлении полупроводниковых микроэлектромеханических устройств, при этом электростатическое соединение является одной из основных технологий формирования таких образцов [1], [11].

В работе [1] было выполнено исследование процесса лазерного раскалывания двухслойных

структур из кремния и стекла с учетом анизотропии упругих свойств монокристаллического кремния с использованием лазерного пучка с длиной волны равной 1,06 мкм, фокусируемого со стороны стеклянного слоя.

В данной работе представлены результаты численного моделирования лазерного раскалывания двухслойных структур из монокристаллического кремния и стекла при лазерном нагреве пучками с длинами волн равными 1,06 мкм и 10,6 мкм и воздействии хладагента. Так же в статье приведены результаты моделирования однолучевой лазерной обработки двухслойной структуры пучком с длиной волны равной 1,06 мкм с применением и без применения воздействия хладагента. При этом анализ проводился как для случая обработки со стороны стеклянного слоя, так и для случая лазерного воздействия со стороны монокристаллического кремния. Моделирование выполнено в трехмерной постановке для трех срезов кристаллов кремния, используемых при формировании двухслойных структур: (100), (110), (111).

1 Параметры моделирования

Конечно-элементное моделирование процесса лазерного раскалывания двухслойных

структур из монокристаллического кремния и стекла было осуществлено в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [12]. Для определения направления развития лазерно-индуцированной трещины был применен критерий максимальных растягивающих напряжений [13].

При моделировании полагалось, что коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность стекла ЛК5 и монокристаллического кремния постоянны и равны соответственно $\lambda_1 = 1,13 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $C_1 = 795 \text{ Дж/Кг} \cdot ^\circ\text{С}$, $\rho_1 = 2270 \text{ кг/м}^3$ для стекла и $\lambda_2 = 109 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $C_2 = 758 \text{ Дж/Кг} \cdot ^\circ\text{С}$, $\rho_2 = 2330 \text{ кг/м}^3$ для кремния. Были учтены зависимости коэффициентов линейного термического расширения стекла ЛК5 и монокристаллического кремния от температуры. При расчетах использовались данные о значениях коэффициентов отражения и поглощения монокристаллического кремния и оптического стекла для лазерного излучения с длинами волн 1,06 мкм и 10,6 мкм. Модуль упругости, коэффициент Пуассона для стекла полагались равными $E_1 = 68,5 \text{ ГПа}$, $\nu_1 = 0,184$. При моделировании использовались следующие константы упругой жесткости кристаллического кремния: $C_{11} = 165,6 \text{ ГПа}$, $C_{12} = 63,9 \text{ ГПа}$, $C_{44} = 79,5 \text{ ГПа}$ [1], [11], [14]–[19].

Расчеты были выполнены для следующих параметров лазерных пучков: радиус пятна излучения $R_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ для пучка с длиной волны излучения $\lambda_1 = 1,06 \text{ мкм}$ и мощностью излучения $P_0 = 200 \text{ Вт}$; радиус пятна излучения $R_2 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ для пучка с длиной волны излучения $\lambda_2 = 10,6 \text{ мкм}$ и мощностью излучения $P_0 = 10 \text{ Вт}$. Расчеты проводились для двухслойных дисков из монокристаллического кремния и стекла с радиусом $R = 15,5 \text{ мм}$ (толщина слоя кремния $H_1 = 0,5 \text{ мм}$, толщина слоя стекла $H_2 = 0,5 \text{ мм}$). Скорость перемещения образца относительно лазерных пучков и хладагента была равна $V = 10 \text{ мм/с}$.

Для проведения сравнительного анализа были выполнены расчеты распределения термоупругих полей для шести пространственных вариантов расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента:

А) лазерное раскалывание двухслойной структуры при последовательном лазерном нагреве пучками с длинами волн равными 1,06 мкм и 10,6 мкм и воздействии хладагента со стороны монокристаллического кремния (рисунок 1.1, горизонтальной стрелкой отмечено направление перемещения изделия относительно лазерных пучков и хладагента);

В) лазерное раскалывание двухслойной структуры при последовательном лазерном нагреве пучком с длиной волны равной 1,06 мкм и воздействии хладагента со стороны монокристаллического кремния (рисунок 1.2);

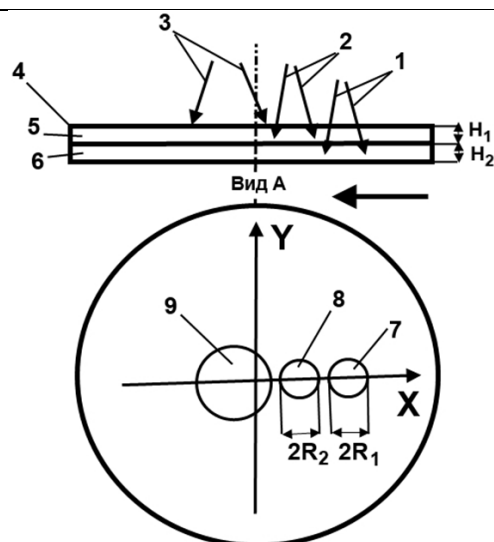


Рисунок 1.1 – Схема пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента (вариант А)

- 1 – лазерный пучок с длиной волны 1,06 мкм,
- 2 – лазерный пучок с длиной волны 10,6 мкм,
- 3 – хладагент,
- 4 – обрабатываемая двухслойная структура из монокристаллического кремния 5 и стекла 6,
- 7 – сечение лазерного пучка 1 в плоскости обработки,
- 8 – сечение лазерного пучка 2 в плоскости обработки,
- 9 – зона воздействия хладагента.

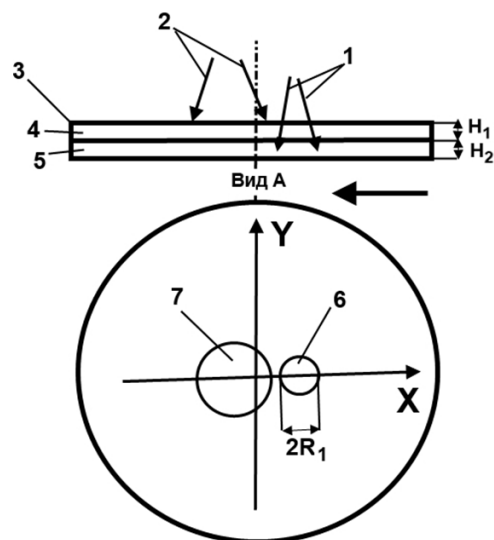


Рисунок 1.2 – Схема пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента (вариант В)

- 1 – лазерный пучок с длиной волны 1,06 мкм,
- 2 – хладагент,
- 3 – обрабатываемая двухслойная структура из монокристаллического кремния 4 и стекла 5,
- 6 – сечение лазерного пучка 1 в плоскости обработки,
- 7 – зона воздействия хладагента.

С) лазерное раскалывание двухслойной структуры при лазерном нагреве пучком с длиной волны равной 1,06 мкм со стороны монокристаллического кремния (рисунок 1.3);

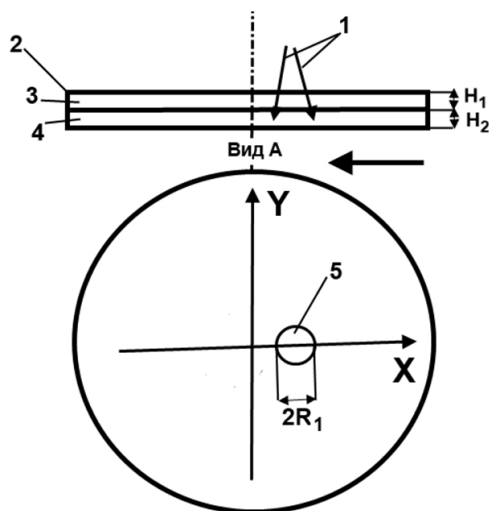


Рисунок 1.3 – Схема пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента (вариант С)

1 – лазерный пучок с длиной волны 1,06 мкм,
2 – обрабатываемая двухслойная структура из монокристаллического кремния 3 и стекла 4,
5 – сечение лазерного пучка 1 в плоскости обработки.

Д) лазерное раскалывание двухслойной структуры при последовательном лазерном нагреве пучками с длинами волн равными 1,06 мкм и 10,6 мкм и воздействии хладагента со стороны стеклянного слоя;

Е) лазерное раскалывание двухслойной структуры при последовательном лазерном нагреве пучком с длиной волны равной 1,06 мкм и воздействии хладагента со стороны стеклянного слоя;

Ф) лазерное раскалывание двухслойной структуры при лазерном нагреве пучком с длиной волны равной 1,06 мкм со стороны стеклянного слоя.

Взаимное расположение зон воздействия лазерных пучков и хладагента для вариантов обработки Д, Е, Ф совпадает с вариантами А, В, С соответственно с учетом их воздействия со стороны стеклянного слоя.

Расчет термоупругих полей в двухслойной структуре для каждого из шести пространственных вариантов расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента выполнялся для шести различных вариантов, учитывающих анизотропию кремниевого слоя: Ia – анализ среза (100), при резке в направлении [001]; Ib – анализ среза (100), при резке в направлении [011]; Па – анализ среза (110), при резке в направлении [1–10]; Pb – анализ среза (110), при резке

в направлении [001]; Пс – анализ среза (110), при резке в направлении [1–11], Пг – анализ среза (111), при резке в направлении [1]–[10].

2 Анализ полученных результатов

Результаты проведенных расчетов приведены в таблицах 2.1–2.2 и на рисунках 2.1–2.3. В таблице 2.1 приведены расчетные значения максимальных и минимальных температур в обрабатываемой двухслойной структуре. В таблице 2.2 приведены расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки. На рисунках 2.1–2.4 представлены распределения температурных полей и полей термоупругих напряжений, формируемых в двухслойной структуре для каждого из шести пространственных вариантов расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента при резке в направлении [001] среза (100) монокристаллического кремния (вариант Ia, учитывающий анизотропию кремниевого слоя в двухслойной структуре). При этом на рисунках 2.1–2.2 буквами а, б, в обозначены варианты А, В, С пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента. На рисунках 2.3–2.4 буквами а, б, в обозначены соответственно варианты Д, Е, Ф пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента.

Из-за отсутствия у кристаллов кремния анизотропии теплопроводности расчетные значения температур в зоне лазерной обработки для срезов (110), (100) и (111) совпадают при выборе одинаковых параметров обработки. Необходимо принимать во внимание существенную разницу в значениях коэффициентов теплопроводности кремния и стекла. При анализе полученных результатов, целесообразно учитывать существенное влияние значений коэффициентов поглощения и отражения монокристаллического кремния и стекла для излучения с длинами волн равными 1,06 мкм и 10,6 мкм на особенности локализации температурных полей и их расчетные значения.

Из данных, представленных в таблице 2.1, следует, что максимальные значения температуры для всех шести режимов моделирования не превышают температуру размягчения стекла, что является важным критерием выбора технологических параметров лазерной обработки двухслойных структур из монокристаллического кремния и стекла на основании информации о температурных полях [9]. Таким образом, расчетные значения температур находятся в интервале, необходимом для реализации хрупкого разрушения двухслойной пластины под действием термоупругих напряжений. При этом наибольшими значениями температуры характеризуются режимы двулучевой обработки (696 К для варианта А и 777 К для варианта Д соответственно). Наименьшие значения температуры в

зоне обработки формируются при однолучевой схеме с использованием хладагента (563 К для варианта В и 718 К для варианта Е соответственно).

На рисунке 2.1, а видно наличие двух ярко выраженных локальных областей с высокими значениями температуры при двухлучевой обработке со стороны монокристаллического кремния: в объеме кремниевой пластины в зоне воздействия YAG-лазера и на границе слоев в зоне воздействия CO₂-лазера. Использование двухлучевой схемы при воздействии со стороны стеклянного слоя приводит к формированию в объеме двухслойной структуры одной непрерывной области с высокими значениями температур (рисунок 2.2, а). При реализации однолучевого варианта с использованием YAG-лазера ($\lambda_1 = 1,06$ мкм) в случае обработки со стороны монокристаллического кремния, как с применением хладагента, так и без него формируется область с высокими температурами только в слое кремния (рисунок 2.1, б и 2.1, в). Реализации однолучевых вариантов обработки при воздействии со стороны стеклянного слоя, так же как и при двухлучевом воздействии, приводит к формированию области, характеризующейся высокими значениями температуры в двух слоях одновременно (рисунок 2.3, б и 2.3, в).

Как уже отмечалось ранее, в таблице 2.2 приведены расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия, формируемые в зоне обработки при лазерном раскалывании для шести пространственных

вариантов расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента и для шести различных вариантов, учитывающих анизотропию кремниевого слоя.

Из анализа данных (таблица 2.2) видно, что разница в величинах максимальных растягивающих напряжений в двухслойных структурах, обусловленных анизотропией кремния, достигает 30%. Разница в величинах максимальных растягивающих напряжений, обусловленная пространственным расположением зон воздействия лазерного излучения и хладагента, достигает 80%.

При этом наибольших значений напряжения растяжения достигают для комбинации (III, А) при раскалывании среза (111) в случае перемещения лазерных пучков и хладагента в направлении [1]–[10] со стороны монокристаллического кремния. Наименьших значений напряжения растяжения достигают для комбинации (Ia, С) при раскалывании среза (100) в случае перемещения лазерного пучка с длиной волны 1,06 мкм в направлении [001] со стороны монокристаллического кремния. Расчетные значения соответствующих растягивающих напряжений в зоне обработки составляют 72 МПа и 35 МПа.

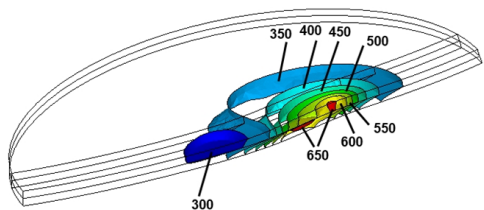
С учетом указанных выше отличий в величинах термоупругих напряжений представляется целесообразным выбирать технологические параметры процесса разделения двухслойных структур методом лазерного раскалывания (например, за счет изменения скорости обработки или мощности лазерного излучения).

Таблица 2.1 – Расчетные значения максимальных и минимальных температур в обрабатываемой двухслойной структуре

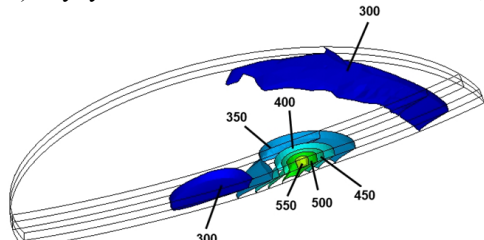
Температура в обрабатываемой двухслойной структуре Т, К	Вариант расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента					
	А	В	С	Д	Е	F
максимальная	696	563	645	777	718	733
минимальная	294	294	297	294	295	298

Таблица 2.2 – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки двухслойной структуры

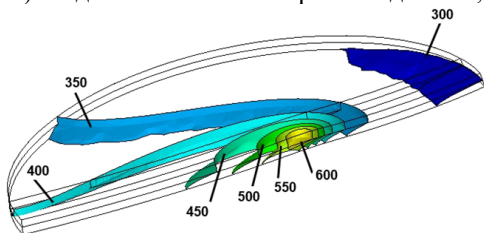
Вариант среза кремния	Максимальные напряжения в зоне обработки σ_{yy} , МПа	Вариант расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента					
		А	В	С	Д	Е	Ф
Ia	растяжения	56	40	35	48	42	40
	сжатия	140	113	127	164	169	163
Ib	растяжения	60	43	38	48	42	40
	сжатия	138	113	125	164	169	164
IIa	растяжения	58	42	39	52	40	46
	сжатия	150	120	137	176	181	176
IIb	растяжения	67	49	39	52	40	46
	сжатия	166	134	151	176	181	176
IIc	растяжения	65	47	42	52	40	45
	сжатия	157	127	142	176	181	177
III	растяжения	72	52	40	56	43	46
	сжатия	178	142	162	208	214	208



а) двулучевое воздействие с хладагентом;

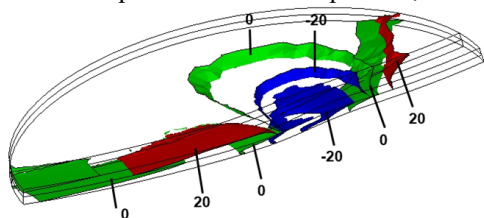


б) воздействие YAG-лазера и хладагента;

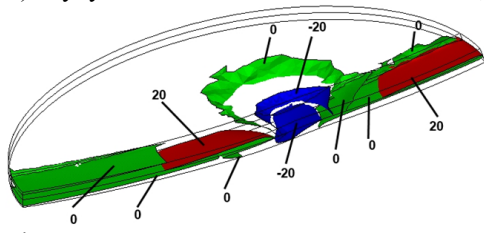


в) воздействие YAG-лазера

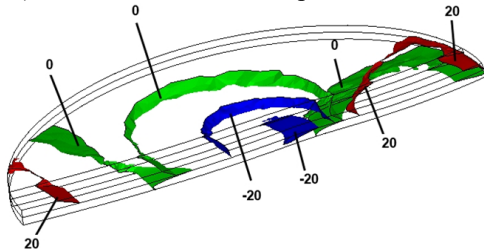
Рисунок 2.1 – Распределение температуры в объеме обрабатываемого двухслойного образца при обработке со стороны монокристаллического кремния, К



а) двулучевое воздействие с хладагентом;

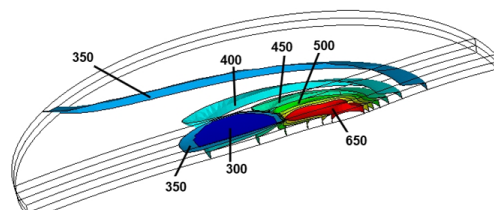


б) воздействие YAG-лазера и хладагента;

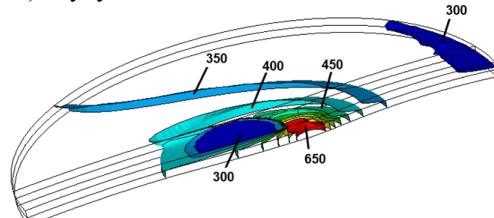


в) воздействие YAG-лазера

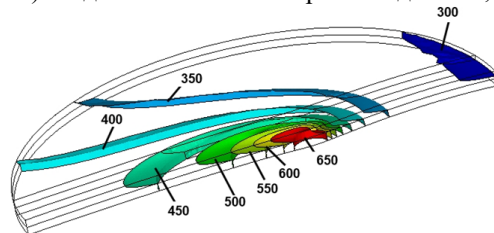
Рисунок 2.2 – Распределение напряжений σ_{yy} в объеме обрабатываемого двухслойного образца при обработке со стороны монокристаллического кремния, МПа



а) двулучевое воздействие с хладагентом;

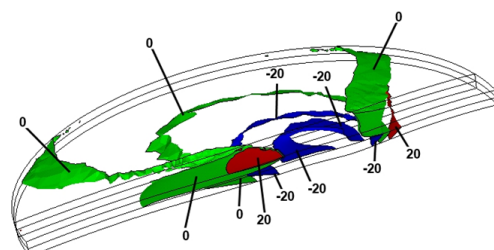


б) воздействие YAG-лазера и хладагента;

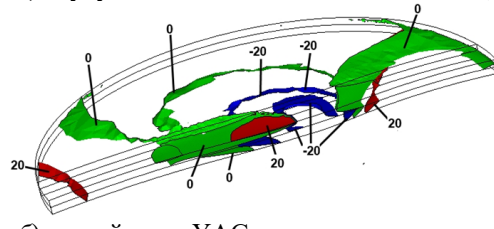


в) воздействие YAG-лазера

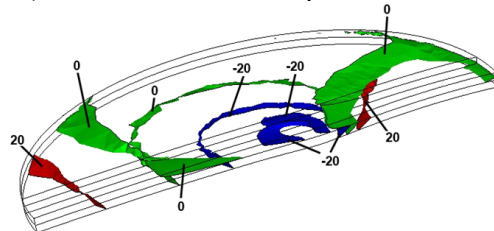
Рисунок 2.3 – Распределение температуры в объеме обрабатываемого двухслойного образца при обработке со стороны стеклнного слоя, К



а) двулучевое воздействие с хладагентом;



б) воздействие YAG-лазера и хладагента;



в) воздействие YAG-лазера

Рисунок 2.4 – Распределение напряжений σ_{yy} в объеме обрабатываемого двухслойного образца при обработке со стороны монокристаллического кремния, МПа

Отдельно нужно обратить внимание на особенности пространственной локализации термоупругих полей формируемых в результате лазерного раскалывания двухслойных структур при реализации шести расчетных вариантов пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента. Из рассмотрения рисунков 2.2 и 2.4 видно, что при реализации вариантов с использованием хладагента в зоне его воздействия на поверхности обрабатываемого образца формируются значительные по величине растягивающие напряжения (рисунки 2.2, а; 2.2, б; 2.4, а; 2.4, б). В случае однолучевых вариантов обработки области значительных по величине растягивающих напряжений так же формируются в двухслойной структуре, но на значительном удалении от центра лазерного пучка (рисунки 2.2, в и 2.4, в). На практике это приведет к нестабильности процесса лазерного раскалывания и возможности отклонения индуцированных лазерным излучением трещин от линии обработки.

Так же следует обратить внимание на пространственные конфигурации границы между напряжениями растяжения и сжатия в двухслойных структурах в зоне обработки (см. изоповерхности при $\sigma_{yy} = 0$), так как по ним можно прогнозировать успешность распространения сформированной на поверхности первого слоя в зоне воздействия хладагента трещины в обоих слоях. При этом наиболее эффективным представляется использование лазерного раскалывания двухслойной структуры при последовательном лазерном нагреве пучками с длинами волн равными 1,06 мкм и 10,6 мкм и воздействии хладагента со стороны монокристаллического кремния (рисунки 2.2, а).

Заключение

Полученные результаты показывают необходимость учета анизотропии упругих свойств монокристаллического кремния при выборе параметров лазерного раскалывания двухслойных структур из кремния и стекла. В работе показана целесообразность применения двухлучевой схемы обработки двухслойных структур со стороны слоя кремния, как наиболее эффективной.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Laser cutting silicon-glass double layer wafer with laser induced thermal-crack propagation* / Y.C. Cai [et al.] // Opt. Laser. Eng. – 2019. – № 82. – P. 173–185.
2. *Способ резки неметаллических материалов*: пат. 2404931 РФ, МКИ 5 C03B33/09 / В.С. Кондратенко, А.С. Наумов; заявитель В.С. Кондратенко; заявл. 28.08.2009; опубл. 27.11.2010.
3. *Способ резки неметаллических материалов*: пат. 2024441 РФ, МКИ 5 C03B33/02 / В.С. Кондратенко; заявитель В.С. Кондратенко; заявл. 04.02.92; опубл. 12.15.1994.
4. *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.
5. *A study on separating of a silicon wafer with moving laser beam by using thermal stress cleaving technique* / A.M. Saman [et al.] // J. Mater. Process. Tech. – 2015. – № 223. – P. 252–261.
6. *Концепция двухлазерного термораскалывания стеклянных элементов для космических аппаратов* / В.К. Сысоев [и др.] // Вестник «ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина». – 2011. – № 1. – С. 38–44.
7. *Numerical study on thermal stress cutting of silicon wafer using two-point pulsed laser* / Jian Liu [et al.] // Optica Applicata. – 2011. – Vol. XLI, № 1. – P. 247–255.
8. *Junke, J.* Cutting glass substrates with dual-laser beams / J. Junke, W. Xinbing // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47. – P. 860–864.
9. *Двулучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов* / С.В. Шалупаев [и др.] // Оптический журнал. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.
10. *Лазерная резка керамических материалов с металлизированной поверхностью* / С.В. Шалупаев [и др.] // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 10. – С. 41–44.
11. *Синев, Л.С.* Оценка механических напряжений в соединенных при повышенной температуре кремнии и стекле / Л.С. Синев // Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Электрон. Журн. – 2014. – № 12. – С. 946–960.
12. *Шабров, Н.Н.* Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 212 с.
13. *Карзов, Г.П.* Физико – механическое моделирование процессов разрушения / Г.П. Карзов, Б.З. Марголин, В.А. Шевцова. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
14. *Справочник по электротехническим материалам* / Ю.В. Корицкий [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
15. *Концевой, Ю.А.* Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фатахов. – М.: Радио и связь, 1982. – 240 с.
16. *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.
17. *Акустические кристаллы* / А.А.Блистанов [и др.]; под общ. ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982. – 632 с.
18. *Технология полупроводникового кремния* / Э.С. Фалкевич [и др.]. – М.: Металлургия, 1992. – 408 с.
19. *ГОСТ 13659-68.* Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические свойства. Параметры. – Москва, 1968.

Поступила в редакцию 27.07.2020.