

**Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, С. В. Шалупаев, А. А. Серeda**  
*г. Гомель, ГГУ имени Ф. Скорины*

## **ЭФФЕКТИВНАЯ ДВУЛУЧЕВАЯ СХЕМА РАСКАЛЫВАНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ИЗ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ И СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖЕК**

Для разделения приборных пластин на кристаллы используется механическое и лазерное скрайбирование, резка с помощью алмазных дисков и лазерное раскалывание [1–3]. При этом успешная реализация лазерного раскалывания кристаллических и аморфных материалов обеспечивается за счет применения двулучевых схем обработки [4–5]. Использование двулучевых технологий характеризуется высокой эффективностью при обработке структур, состоящих из различных материалов [6].

Применение двухслойных структур из монокристаллического кремния и стекла широко используется при изготовлении полупроводниковых микроэлектромеханических устройств [1, 7].

В работе [8] представлены результаты исследования двулучевого лазерного раскалывания двухслойных структур из кремния и стекла с учетом анизотропии упругих свойств монокристаллического кремния при последовательном лазерном нагреве пучками с длинами волн равными 1,06 мкм и 10,6 мкм и воздействии хладагента.

В данной работе представлены результаты конечно-элементного моделирования лазерного раскалывания данных двухслойных структур при использовании более эффективной схемы обработки (см. рисунок 1).

Численное моделирование лазерного раскалывания двухслойных структур из монокристаллического кремния и стекла было выполнено в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [9]. Для определения параметров формирования лазерно-индуцированной трещины был применен критерий максимальных растягивающих напряжений [10].

При расчетах считалось, что удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность стекла ЛК5 и монокристаллического кремния постоянны и равны соответственно  $C_1 = 795$  Дж/Кг·°С,  $\lambda_1 = 1,13$  Вт/м·К,  $\rho_1 = 2270$  кг/м<sup>3</sup> для стекла и  $C_2 = 758$  Дж/Кг·°С,  $\lambda_2 = 109$  Вт/м·К,  $\rho_2 = 2330$  кг/м<sup>3</sup> для кремния. Был выполнен учет зависимости коэффициентов линейного термического расширения материалов от температуры. Коэффициент Пуассона, модуль упругости, для стекла полагались равными  $\nu_1 = 0,184$ ,  $E_1 = 68,5$  ГПа. При расчетах были использованы следующие константы упругой жесткости кристаллического кремния:  $C_{11} = 165,6$ -ГПа,  $C_{12} = 63,9$ -ГПа,  $C_{44} = 79,5$ -ГПа [1,7, 11–15].

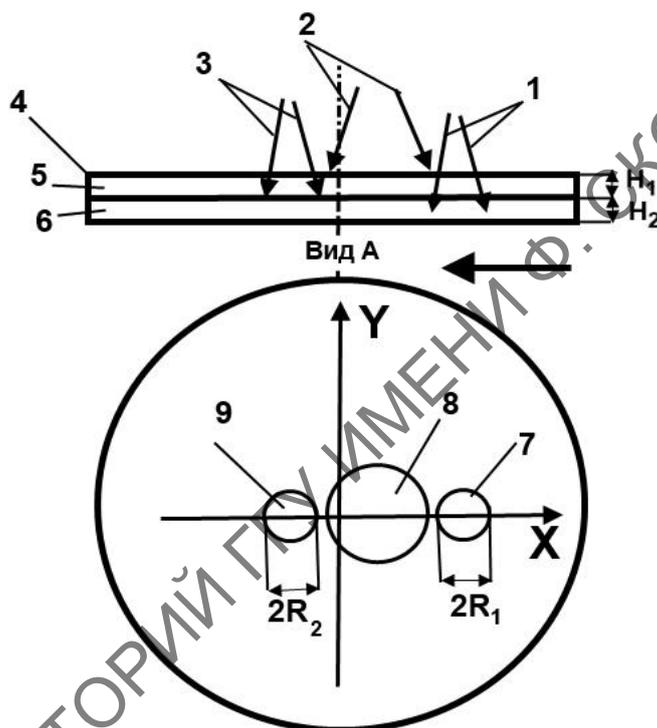


Рисунок 1 – Схема пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента

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

При моделировании использовались следующие параметры лазерных пучков: радиус пятна излучения  $R_2 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м для пучка с длиной волны излучения  $\lambda_2 = 10,6$  мкм и мощностью излучения  $P_0 = 10$  Вт, радиус пятна излучения  $R_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м для пучка с длиной волны излучения  $\lambda_1 = 1,06$  мкм и мощностью излучения  $P_0 = 200$  Вт. Моделирование было выполнено для двухслойных дисков из монокристаллического кремния и стекла с радиусом  $R = 15,5$  мм (толщина слоя стекла  $H_2 = 0,5$  мм, толщина слоя кремния  $H_1 = 0,5$  мм). Скорость обработки была равна  $V = 10$  мм/с.

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: I a – анализ среза (100), при резке в направлении [001]; I b – анализ среза (100), при резке в направлении [011]; II a – анализ среза (110), при резке в направлении [1–10]; II b – анализ среза (110), при резке в направлении [001]; II c – анализ среза (110), при резке в направлении [1–11], III – анализ среза (111), при резке в направлении [1–10].

В таблице 1 представлены расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки.

Таблица 1 – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки двухслойной структуры

Вариант среза кремния		Ia	Ib	IIa	IIb	IIc	III
Максимальные напряжения в зоне обработки $\sigma_{yy}$ , МПа	растяжения	45	48	47	54	53	58
	сжатия	111	111	118	132	125	140

На рисунках 2–3 приведены распределения температурных полей и полей термоупругих напряжений, формируемых в двухслойной структуре для предложенной схемы обработки при резке в направлении [001] среза (100) монокристаллического кремния (вариант Ia).

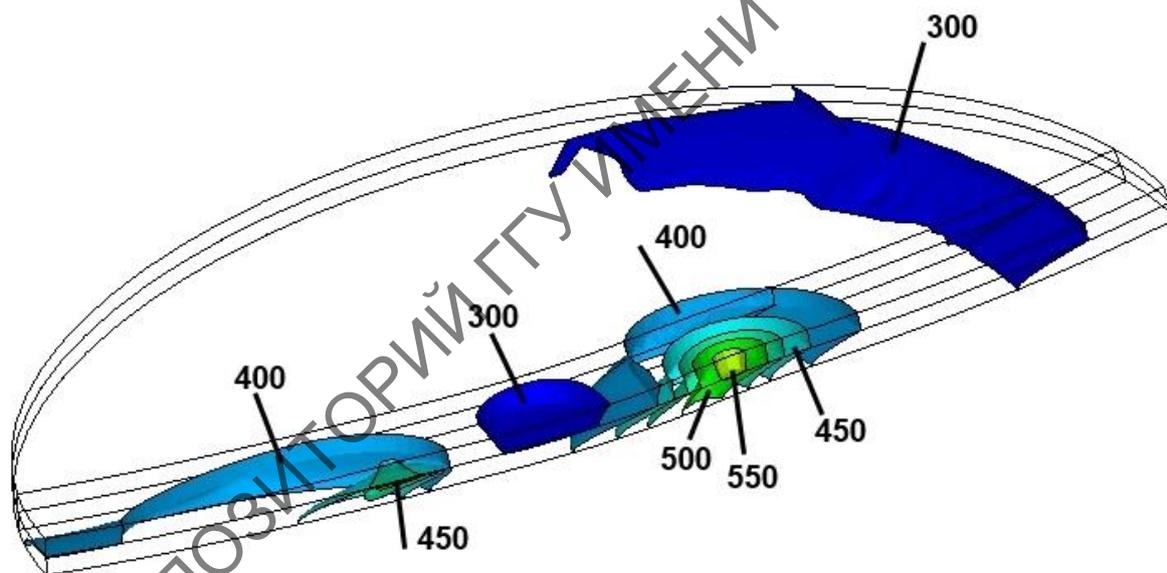


Рисунок 2 – Распределение температуры в объеме обрабатываемого двухслойного образца, К

Анализ данных представленных в таблице 1 и на рисунках 1–2 показывает, что при реализации предложенной двулучевой схемы (см. рисунок 1) максимальные значения температур и термоупругих напряжений в зоне обработки немного ниже значений полученных при реализации соответствующей двулучевой схемы исследуемой в [9]. При этом применение предложенной схемы обеспечивает формирование в слое стекла области растягивающих напряжений, примыкающей к области растягивающих напряжений сформированных в слое кристаллического кремния в результате воздействия лазерного пучка с длиной волны 1,06 мкм и хладагента. Такая пространственная конфигурация термоупругих полей является необходимым условием формирования лазерно-индуцированных трещин с заданными геометрическими характеристиками при резке двухслойных структур из кристаллического кремния и стекла.

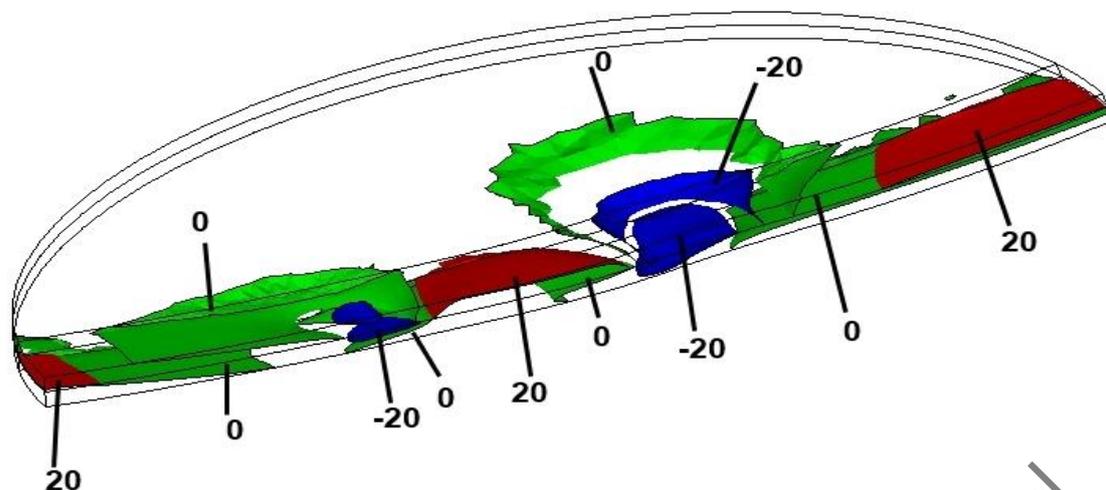


Рисунок 3 – Распределение напряжений  $\sigma_{yy}$  в объеме обрабатываемого двухслойного образца, МПа

### Список использованных источников

1 Cai, Y. C. Laser cutting silicon-glass double layer wafer with laser induced thermal-crack propagation / Y. C. Cai, L. J. Yang, H. Z. Zhang, Y. Wang // Optics and Lasers in Engineering. – 2016. – Vol. 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. – Оpubл. 27.11.2010.

3 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.

4 Junke, J. Cutting glass substrates with dual-laser beams / J. Junke, W. Xinbing // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47. – P. 860–864.

5 Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Серeda // Оптический журнал. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.

6 Лазерная резка керамических материалов с металлизированной поверхностью / С. В. Шалупаев, А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, Ю. В. Никитюк // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 10. – С. 41–44.

7 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

8 Никитюк, Ю. В. Исследование процесса лазерного раскалывания двухслойных структур из пластин кремния и стеклянных подложек / Ю. В. Никитюк // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 3 (44). – С44–49

9 Шабров, Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н. Н. Шабров. – Ленинград : Машиностроение, 1983. – 212 с.

10 Карзов, Г. П. Физико – механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Шевцова. – Санкт-Петербург : Политехника, 1993. – 391 с.

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

12 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.

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

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

15 Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические свойства. Параметры : ГОСТ 13659-68. – Москва : Издательство стандартов, 1968. – 62 с.