Тема 8 Лазерное термораскалывание анизотропных материалов

Перечень изучаемых вопросов :

1. Общие сведения о кристаллическом кремнии и кварце

1.1 Кремний

1.2 Кварц

2. Основные теплофизические свойства кремния и кварца

3.Закон Гука для анизотропных материалов

4.Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния

5.Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца

1 Общие сведения о кристаллическом кремнии и кварце

1.1 Кремний

Кремний по распространенности в природе занимает второе место, уступая только кислороду. Земная кора содержит 26 - 29,5 % Si.

Около 12 % литосферы составляет кремнезем в виде кварца и его разновидностей, 75 % литосферы состоит из силикатов и алюмосиликатов. В чистом виде кремний до создания на его основе полупроводниковых приборов практически не использовался.

Кремний в полупроводниковых приборах применяется сравнительно давно. Еще в начале XX в. были описаны детекторы, работающие на основе точечных контактов кремний - металл и кремний - углерод. В первой половине 40-х годов изготовлены кремниевые диоды, в начале 50-х создан кремниевый транзистор, а в первой половине 60-х -интегральные схемы.

настоящее время B кремний является одним ИЗ важнейших полупроводниковых материалов. На основе кремния изготовляется 95% всех видов полупроводниковых устройств, с помощью которых обрабатывают и хранят информацию, преобразуют солнечную энергию в электрическую и т. д.

Кристаллографическое направление, по которому выращивают монокристаллы кремния, зависит от типа его кристаллической решетки, свойств кристаллографических плоскостей и особенностей тех полупроводниковых приборов, которые будут изготовлены на основе этого кремния.

Сочетание этих требований привело к тому, что монокристаллы кремния выращивают преимущественно по направлениям [100] и [111].

Однако иногда используют также монокристаллы с направлением продольной оси [110].

Атомное строение кремния





Рисунок 3 – Плотность сеток кремния

Помимо плотностей сеток, надо принимать во внимание их взаимное расположение.

Разрезы структуры кремния

1 – разрез нормально к сеткам (111);

- 2 разрез нормально к сеткам (110);
- 3 разрез нормально к сеткам (100)

Индексы Миллера основных плоскостей кубических кристаллов





1.2 Кварц

Кристаллический кварц - самое распространенное на земле соединение.

В кварце сочетаются высокая механическая прочность, химическая стойкость диэлектрические И свойства с ярко выраженными пьезоэлектрическими свойствами, что позволяет конструировать пьезоэлектрические устройства с высокой стабильностью характеристик (годовое потребление кварцевых кристаллических элементов превышает 1 млрд. долларов в год).

В природе существуют четыре разновидности кварца в зависимости от температуры его образования.

Приставкой греческих букв α и β принято обозначать кристаллы кварца, образовавшиеся при температуре от 573 до 880°С (α - кварц) и при температуре до 573°С (β - кварц). Две еще более высокотемпературные модификации кварца представляют собой тридимит, образовавшийся при температуре от 880 до 1470°С, и кристабалит, образовавшийся при температуре от 1470 до 1710°С. Выше 1710°С любой вид кварца переходит в жидкое состояние.

Главное значение в технике имеет β -кварц, обладающий пьезоэффектом, поэтому в дальнейшем будем называть его просто кварцем

Таблица - 1Сфера применения кри	исталлического кварца
---------------------------------	-----------------------

Область применения	Типы срезов	Типы элементов		
Устройства связи (сотовая связь и беспроводные устройства),измерители времени.	АТ и GT -срезы	кварцевые кристаллические элементы		
Цифровая техника, радиоэлектронное оборудование	Срез Кюри, Ү-срез, ВТ, АТ, СТ, DT, ҮТ.	кристаллические генераторы		
Устройства стабилизации частоты передачи сигналов	AT, IT, FC, SC-срезы	кварцевые резонаторы		
Радиоэлектроника	MT, NT	кристаллические фильтры		
Оптические приборы	кварцевые пластины Х-среза	оптические устройства		

Структурная ячейка кварца



Рисунок 5 – Структурная ячейка кварца

Основой структуры кварца являются винтовые цепочки тетраэдров SiO₄ расположенные по оси симметрии третьего порядка. В структуре кристалла каждый ион Si, обладающий положительным зарядом +4e, тетраздрически окружен четырьмя ионами О, каждый из которых обладает отрицательными зарядами -2e, и каждый ион О связывает два иона Si



Рисунок 6 – Ось симметрии кварца

В тригональной системе, к которой относится в -кварц, за ось с принимается ось симметрии третьего порядка; перпендикулярные к ней три оси симметрии второго порядка являются эквивалентными осями a₁, a₂, a₃. расположенными под углом 120° друг к другу.

прямоугольной пользоваться, Удобно системой координат С обозначением осей X, Y, Z, принятым в математике и физике. Эти оси сдвинуты на определенные углы к истинным кристаллографическим осям кварца и их обычно называют кристаллографическими осями.

Ось Z прямоугольной системы совпадает с осью с. Ось X параллельна какой-либо из осей а, ось Y перпендикулярна осям Z и X.



Рисунок 7 – Условные обозначения срезов кристаллических элементов

Стандартные первоначальные ориентации кристаллических образцов квадратной формы.

Для обозначения срезов используются две буквы, обозначающие кристаллографические оси вдоль которых расположен кристаллический элемент, при этом первая буква определяет, какая из осей направлена вдоль

толщины образца, а вторая буква соответствует оси направленной вдоль длины образца

Свойства материала	Кремний	Кварц
Плотность, кг/м ³	2330	2643
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	758	741
Теплопроводность, Вт/ м ·К	109	12,3 (II) 6,8 ([⊥])
КЛТР,град ⁻¹ ·10 ⁻⁷	23,3	90 (II) 148 (

Таблица 2 – Основные теплофизические свойства кремния и кварца

(II) - вдоль оси симметрии третьего порядка Z

([⊥]) – перпендикулярно оси симметрии третьего порядка Z (

Модули Юнга монокристаллического кремния для различных кристаллографических направлений



Рисунок 8 – Модули Юнга монокристаллического кремния

Модули Юнга монокристаллического кремния для различных кристаллографических плоскостей



Рисунок 9 – Модули Юнга монокристаллического кремния для различных кристаллографических плоскостей



Монокристаллические твердые тела являются телами анизотропными. В общем случае для монокристаллов любые произвольно выбранные направления по свойствам неэквивалентны.

Напряжения и деформации описываются тензорами второго ранга, каждый из которых определяется девятью компонентами.

Если деформация бесконечно мала и однородна, то каждая компонента тензора деформации линейно связана со всеми компонентами тензора напряжений и, наоборот, каждая компонента тензора напряжения линейно связана со всеми компонентами тензора деформаций.

В этом заключается сущность закона Гука для анизотропных твердых тел.

Математический закон Гука для монокристаллов запишется в виде

 $\sigma_{ii} = C_{iikl} \varepsilon_{kl}$

либо как

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \tag{2}$$

(1)

Где S_{ijrl} и C_{ijrl} константы податливости и жесткости кристалла соответственно. Всего будет по 81 компоненте.

Величины S_{ijkl} и C_{ijkl} образуют тензор четвертого ранга. Тензор, составленный из коэффициентов C_{ijkl}, называют тензором упругой жесткости или просто тензором упругости.

Тензор, составленный из коэффициентов S_{ijkl}, называют тензором упругой податливости.

Так как тензоры деформации и напряжения являются симметричными тензорами второго ранга, то независимых компонент и будет уже не 81, а только 36, поскольку в этом случае



Для кристаллов тензоры упругих модулей, каждый из которых составлен из 36 компонент, в свою очередь также являются симметричными, т. е. компоненты симметричны и относительно перестановки пар индексов:

$$S_{ijkl} = S_{klij} \qquad S_{ijkl} = S_{klij} \qquad (4)$$

Наличие таких равенств приводит к тому, что в общем случае число независимых компонент тензоров упругих модулей сокращается с 36 до 21 - столько констант имеет твердое тело, не обладающее никакой симметрией. При решении многих конкретных задач для упругих модулей полезна запись в матричных обозначениях, поскольку она уменьшает число индексов у компонентов.

При матричной записи двойное сочетание ij=m и kl=n заменяется одним индексом от 1 до 6 по следующей схеме:

11 - 1; 22 - 2; 33 - 3; 23, 32 - 4; 31, 13 -5; 12, 21 - 6.

Коэффициенты упругой жесткости и упругой податливости можно представить в виде таблиц:

$$\{C_{mn}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \quad \{S_{mn}\} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix}$$

Закон Гука для анизотропных материалов с учетом температурных деформаций может быть записан в матричной форме

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^{6} C_{ik} (\varepsilon_k - \varepsilon_k^t)$$
⁽⁵⁾

Полное число упругих констант сокращается в зависимости от симметрии кристалла. Так, если кристалл обладает триклинной симметрией, то полное число упругих констант равно 21.

Для кристаллов кубической симметрии, к которым относится кремний оно равно 3.

В случае когда пластина из монокристаллического кремния вырезана в плоскости (100) матрица упругой жесткости может быть записана в виде:

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

$$C_{12}=0 \ 6386 \cdot 10^{5} \text{ MII} \text{ a } C_{44}=0 \ 7953 \cdot 10^{5} \text{ MII}$$

 C_{11} =1,656·10⁵ МПа, C_{12} =0,6386·10⁵ МПа, C_{44} =0,7953·10⁵ МПа

В случае когда пластина из монокристаллического кремния вырезана в плоскости (110) матрица упругой жесткости может быть записана в виде:



В случае когда пластина из монокристаллического кремния вырезана в плоскости (111) матрица упругой жесткости может быть записана в виде:

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

Низкотемпературный кварц принадлежит к тригональной системе, вследствие чего его упругие свойства описываются шестью независимыми компонентами тензора модулей упругости, матричная запись которого для среза zy имеет вид

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{12} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{pmatrix}$$

 $C_{11} = 86,75 \cdot 10^9$ МПа, $C_{12} = 5,95 \cdot 10^9$ МПа, $C_{13} = 11,91 \cdot 10^9$ МПа, $C_{14} = -17,8 \cdot 10^9$ МПа, $C_{33} = 107,2 \cdot 10^9$ МПа, $C_{44} = 57,8 \cdot 10^9$ Мпа

Матрица упругих постоянных для среза ух кристаллического кварца может быть записана в виде:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{13} & C_{12} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{33} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{13} & C_{11} & C_{14} & 0 & 0 \\ -C_{14} & 0 & C_{14} & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & -C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{14} & C_{44} \end{pmatrix}$$

Матрица упругих постоянных для среза ху кристаллического кварца может быть записана в виде:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{33} & C_{13} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & C_{14} \\ C_{13} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & -C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & -C_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_{14} & C_{44} & 0 \\ 0 & C_{14} & -C_{14} & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix}$$

4. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния

Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния можно определить на основе численных расчетов полей термоупругих напряжений возникающих в пластинах кристаллического кремния в процессе обработки.

На рисунке 11 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки и формы их сечений. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 - хладагент, позицией 3 – кремниевая пластина, позицией 5 и 4 отмечены соответственно сечения лазерного пучка 1 и зоны воздействия хладагента 2 на плоскости обработки. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

103



Рисунок 11 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в илоскости обработки

Расчеты проводились 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. 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 равными 1,06 и 0,808 мкм. Выбор для проведения численного моделирования лазерного излучения с длиной волны равной 1,06 мкм был обусловлен необходимостью проведения экспериментальной проверки результатов численного моделирования. Использование для численных расчетов параметров 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 осуществлялось при помощи установки, в



состав которой входил лазер, генерирующий излучение на данной длине волны.

а) для скорости обработки v=10 мм/с, б) для скорости обработки v=100 мм/с Рисунок 13 – Распределение полей температурных напряжений (Мпа) на поверхности кремниевой пластины, вырезанной в плоскости (111), при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 0,808 мкм

Для проведения сравнительного анализа расчеты были выполнены для трех различных вариантов: изотропная пластина; платина, вырезанная в плоскости (100) и пластина, вырезанная в плоскости (111). При этом моделировались результаты воздействия лазерного излучения с длинами волн равными 1,06 и 0,808 мкм на пластины толщиной 0,2 и 0,4 мм, перемещающиеся относительно лазерного излучения со скоростями 10 мм/с и 100 мм/с.



а) для скорости обработки v=10 мм/с,б) для скорости обработки v=100 мм/с Рисунок 12 – Распределение температурных полей (К) на поверхности кремниевой пластины, вырезанной в плоскости (111), при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 0,808 мкм

Результаты проведенных расчетов приведены в таблицах 3 и 4 и на рисунках 12 и 13. Из анализа данных, приведенных в таблице 1, 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 необходимо отметить определяющее влияние большого значения коэффициента теплопроводности на формирование температурных полей лазерном термораскалывании кремниевых пластин. Значение при 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.

a)

б)

В таблице 4 приведены расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия, формируемые в зоне обработки при управляемом лазерном термораскалывании для трех различных вариантов: I – трехмерный анализ изотропной пластины (I а – по данным работы [13], II b – по данным работы [14]), II – трехмерный анализ анизотропной пластины, вырезанной в плоскости (100). III – трехмерный анализ анизотропной пластины, вырезанной в плоскости (111).

Анализ данных приведенных в таблице 3 позволяет сделать вывод о том, что использование изотропной модели процесса управляемого лазерного термораскалывания таких анизотронных 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 платины, вырезанной в плоскости (111) эти погрешности достигает 39 % и 20 % для вариантов Ia и Ib соответственно.

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 %. Указанная разница должна быть учтена при выборе параметров процесса разделения (например, за счет изменения скорости резки или мощности лазерного излучения).

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 промышленности для оптимизации процесса прецизионного разделения приборных пластин на кристаллы.

Вид торца кремниевой пластины, разделенной методом управляемого лазерного термораскалывания представлен на рисунке.



Таблица 3 – Расчетные значения максимальных и минимальных температур в обрабатываемой пластине

Температура в	лазерное и	излучение		• •	лазерное и	ізлучение		
обрабатываемой	с длиной н	золны			с длиной волны			
пластине	ине 1,06 мкм 0,808 мкм							
Т, К	h=0,2 мм		h=0,4 мм	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
	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	MM/C	мм/с	мм/с	мм/с
максимальная	507	427	508	419	1640	1154	1095	804
минимальная	297	293	304	293	320	293	331	293

Таблица 4 – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

	Iс В ГКИ	лазерное и	злучение	1	V	лазерное и	злучение			
	AH M DOT	с длиной в	олны			с длиной в	олны			
аль ни ра(алн ни ра(1,06 мкм				0,808 мкм				
THI	има же об Па	h=0,2 мм		h=0,4 мм		h=0,2 мм	h=0,2 мм		h=0,4 мм	
рия	Ipg Ing M	v=10	v=100	v=10	v=100	v=10	v=100	v=10	v=100	
Baj	Ма на 30F 5	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	
I a	растяжения	8,2	1,7	7,3	0,9	49,7	10,0	24,0	2,9	
Ιb	растяжения	5,6	1,2	5,0	0,6	33,8	6,8	16,4	2,0	
Π	растяжения	6,3	1,3	5,6	0,7	38,5	7,9	18,6	2,0	
III	растяжения	6,7	1,4	5,8	0,6	40,4	8,1	19,4	2,2	
PHILID 16										

Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца

Анизотропия теплопроводности кварца обуславливает необходимость отдельного рассмотрения температурных полей, формируемых в элементах квадратнойформы для трех случаев обработки из пяти расчетных вариантов, рассматриваемых в данной работе:

– первый случай – резка кристаллической пластины перпендикулярно оси Z, при этом линия разреза лежит в плоскости, перпендикулярной этой оси (I расчетный вариант);

– второй случай – резка кристаллической пластины пернендикулярно оси Z, при этом линия разреза лежит в плоскости, параллельной этой оси (II и V расчетные варианты);

– третий случай – резка кристаллической пластины вдоль оси Z, при этом линия разреза лежит в плоскости, параллельной этой оси (III и IV расчетные варианты).

Для определения вклада анизотропии различных свойств кристаллического кварца на формирование полей температур и температурных напряжений при управляемом лазерном термораскалывании для каждого из пяти вариантов расчета были использованы четыре набора свойств материала:

a) набор свойств, учитывающий зависимость от кристаллографического направления коэффициентов теплопроводности, коэффициентов линейного термического расширения и упругих свойств кристаллов кварца;

b) набор свойств, учитывающий зависимость от кристаллографического направления только коэффициентов теплопроводности;

с) набор свойств, учитывающий зависимость от кристаллографического направления только коэффициентов линейного термического расширения;

d) набор свойств, учитывающий зависимость от кристаллографического направления только упругих свойств кристаллов кварца;

На рисунке 11 приведены схемы расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки для пяти вариантов обработки, исследуемых в данной работе. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 - хладагент, позицией 3 – лазерно-индуцированная трещина, позицией 4 – кварцевая пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.



Рисунок 15 – Схемы расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки

а) I вариант обработки, б) II вариант обработки, в) III вариант обработки, г) IV вариант обработки, г) IV вариант обработки

1 – лазерный пучок, 2 – хладагент, 3 – лазерно-индуцированная трещина, 4 – кварцевая пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

Расчеты проводились для квадратных пластин с геометрическими размерами $20 \times 20 \times 1,5$ мм и $20 \times 20 \times 0,75$ мм для случая воздействия лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм. Радиус пятна лазерного излучения R = 1,5 мм, мощность излучения P = 50 Вт. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной x = 5 мм/с и v = 15 мм/с.

В таблице приведены расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

НТ УТКИ	Максимальная температура в обрабатываемой пластине T, K				
ынал	h = 0.75 мм		h = 1.5 MM		
Bap o6p	v = 5 MM/c	v = 15 MM/c	x = 5 MM/c	v =15 мм/с	
Ι	1546	991	H16	820	
II, V	1468	1013	1163	909	
III, IV	1523	1049	1202	933	

Таблица 5- расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине



Рисунок 16 – Изолинии температурных полей (в градусах Кельвина) на поверхности кварцевой пластины (v = 5 мм/с, h = 0.75 мм) а) II и V варианты обработки, б) III и IV варианты обработки



Рисунок 17 – Изолинии полей температурных напряжений (в единицах МПа) на поверхности кварцевой пластины (v = 5 мм/с, h = 0.75 мм) а) II вариант обработки, б) III вариант обработки



Рисунок 18 – Изолинии полей температурных напряжений (в единицах МПа) на поверхности кварцевой пластины (v = 5 мм/c, h = 0.75 мм) а) IV вариант обработки, б) V вариант обработки

Анализ данных приведенных в таблице 1 показывает, что наименьших значений температура достигает при обработке среза zy (I вариант обработки), что объясняется большими значениями коэффициента теплопроводности вдоль

оси Z кристаллов кварца по сравнению с их значениями в направлениях перпендикулярных этой оси (λ_{||} больше λ_⊥ почти в два раза).

Повышенными значениями температуры характеризуется обработка срезов ух и ху при перемещении лазерного пучка вдоль оси Z (III и IV варианты обработки). Отметим, что эти значения лишь немного больше значений температур формируемых при обработке этих же срезов, в случае перемещения лазерного пучка вдоль оси X и вдоль оси Y соответственно (II и V варианты обработки). Так максимальная разница между III и II вариантами обработки для используемых расчетных параметров не превышает 3,6 %, в то время как разница между III и I вариантами достигает 12,1 %.

art В таблице 6 содержатся расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия, формируемые в зоне обработки для пяти

21

1 avii	таблица о тастетные зна тепих максимальных по вели типе напряжении растяжения и сжатия в зоне обработки									
aHT	ал н не ки,	набор свойств а)				набор свойств b)				
	ИМ ЭСТ)	й ў ^м 5 h=0,75 мм		h=1,5 мм		h=0,75 мм h=1		h=1,5 мм	1,5 мм	
рия	рия ыксі ыс лря в в	v=5	v=15	v=5	v=15	v=5	v=15	v=5	v=15	
Ba	Ма Бні наі наі ия обј	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	
Ι	растяжения	83,8	31,8	42,9	23,5	72,4	27,7	36,4	23,7	
II	растяжения	63,5	21,1	33,2	26,5	69,5	27,0	40,5	31,3	
III	растяжения	85,1	38,8	56,2	43,2	70,4	30,2	48,0	35,8	
IV	растяжения	93,1	42,4	73,0	55,1	70,4	30,2	48,0	39,8	
V	растяжения	65,7	22,7	34,3	26,3	69,5	27,0	40,5	31,3	

Таблица 6 – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Таблица 6 (продолжение) – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

000040	/01 Mil								
инт имал жен	ал н не ки,	набор свойств с)				набор свойств d)			
	ИМ(IЖС 3C	h=0,75 мм		h=1,5 мм		h=0,75 мм		h=1,5 мм	
рия	ukc ble Ips B pa6	v=5	v=15	v=5	v=15	v=5	v=15	v=5	v=15
Ba	М3 БНІ НАІ НАІ ИЯ Обј	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с	мм/с
Ι	растяжения	88,2	33,9	47,9	27,8	60,2	23,4	32,8	22,7
II	растяжения	49,6	16,4	22,3	14,2	88,4	33,1	47,2	34,5
III	растяжения	87,2	36,1 🔿	5 4,0	42,5	64,2	24,8	31,9	16,2
IV	растяжения	87,2	36,1	54,0	42,5	69,1	27,2	37,2	22,3
V	растяжения	49,6	16,4	22,3	14,2	87,2	33,7	47,2	33,9

PEILO3M

Проведенные расчеты позволяют утверждать, что при моделировании управляемого лазерного термораскалывания кристаллов кварца принципиально важно учитывать анизотропию всех его свойств, оказывающих влияние на формирование термоупругих полей в образце. Учет только одной ИЗ анизотропных характеристик материала приводит существенным к погрешностям. Так, например. случае учета только В анизотропии теплопроводности при определении величины напряжений растяжения в зоне обработки для анализируемых режимов погрешность достигает 34,2 %, в случае учета только анизотропии теплого расширения погрешность достигает 46,4 %, а в случае учета только анизотропии упругих свойств погрешность достигает 62,5 %.

Из анализа данных приведенных в таблице 6 следует, что наибольших значений напряжения растяжения достигают во время термораскалывания срезов ух и ху при перемещении лазерного пучка в направлении оси Z (III и IV варианты обработки). Одной из причин этого являются более высокие значения температуры при реализации III и IV – вариантов обработки (см. таблицу 1) в сравнении с другими вариантами обработками. Кроме этого формированию при реализации III и IV – вариантов высоких напряжений растяжения значения коэффициента обработки содействуют большие линейного термического расширения, в направлении перпендикулярном плоскости лазерно-индуцированной трещины по сравнению с их значениями при обработке ух и ху - срезов в направлении осей X и Y соответственно (II и V варианты обработки).

В свою очередь низкие значения температуры в зоне обработки и небольшие значения коэффициента линейного термического расширения, в направлении перпендикулярном плоскости лазерно-индуцированной трещины обуславливают низкие значения напряжений растяжения при реализации II и V вариантов обработки. При этом растягивающие напряжения, формируемые при разделении zy – среза (I вариант обработки), больше расчетных напряжений для II и V вариантов обработки и меньше напряжений для III и IV вариантов обработки, а с другой – большими значения коэффициента линейного термического расширения, в направлении перпендикулярном плоскости лазерно-индуцированной трещины.

• Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об определяющем значении анизотропии теплопроводности кристаллов кварца и анизотропии их теплового расширения на величину термоупругих напряжений, формируемых при управляемом лазерном термораскалывании этого материала. Однако наличие анизотропии упругих свойств обуславливает необходимость отдельного рассмотрения всех пяти вариантов обработки кристаллических элементов квадратной формы со стандартной первоначальной ориентацией, исследуемых в данной работе. Отдельно нужно отметить на особенности пространственной локализации термоупругих полей формируемых при лазерном термораскалывании ху - среза (IV и V режимы).

Как видно из рисунка 18 распределение термоупругих полей, формируемых при управляемом лазерном термораскалывании ху – среза, характеризуется асимметричностью относительно линии воздействия лазерного излучения. Указанная асимметричность полей упругих напряжений на практике будет приводить к нежелательному отклонению лазерно-индуцированной трещины от контура обработки, что необходимо учитывать при выборе параметров термораскалывания.

Для проверки результатов численного моделирования были проведены экспериментальные исследования с использованием лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. На рисунке 19 представлен вид торцов кварцевых пластин, разделенных методом управляемого лазерного термораскалывания.



Рисунок 19 – Вид торцов кварцевых пластин, разделенных методом управляемого лазерного термораскалывания

Список вопросов для самоконтроля:

Какую кристаллическую структуру имеет кремний и кварц?

2 Какие разновидности кварца вы знаете?

3 Укажите какие кристаллографические оси и плоскости присутствуют в кремнии.

4 Приведите основные теплофизические свойства кремния и кварца.

5 В чем заключается сущность закона Гука для анизотропных твердых тел?

6 Нарисуйте зависимость модуля Юнга кремния и кристаллического кварца в зависимости от типа кристаллографической плоскости.

7 Какой вид имеет матрица упругой жесткости для монокристаллического кремния в плоскостях (110), (111) и (100)?

8 Опишите схему метода управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния.

9 На сколько отличаются между собой величины растягивающих напряжений формируемые в пластинах кремния вырезанных в различных кристаллографических плоскостях в области подачи хладагента при управляемом лазерном термораскалывании?

10 Опишите схему метода управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца.

11 На сколько отличаются между собой величины растягивающих напряжений формируемые при управляемом лазерном термораскалывании различных срезов пластин кварца в области подачи хладагента?

Список рекомендуемой литературы:

1 Сиротин, Ю.И. Основы кристаллофизики / Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. – М.: Наука, 1975. – 680 с

2 Е.Б. Шершнев Особенности лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники – 2013. - №3(16). – С.39-44.

3 Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А.Н. Сердюков [и др.] // Кристаллография - 2012. – Т. 57, № 6. - С. 879 - 885.

4 Особенности лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, А.Е. Шершнев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2014. - №6(87). С. 220-224.

5 Исследование процесса лазерного раскалывания кремниевых пластин, вырезанных в плоскости (110) / А.Н. Сердюков, С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А. А. Середа // Проблемы физики, математики и техники – 2012. - №3(12). – С. 37-40

6 Modeling of mechanical influence of double-beam laser on single-crystalline silicon / S.V. Shalupaev, A.N. Serdyukov, G.S. Y.V. Nikitjuk [et al.] // Archives of metallurgy and materials. -2013. -Vol. 58, No4. -P. 1381-1385.

7 Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

8 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.

9 Lackner, T. Determination of axisymmetric elastic constants in anisotropic silicon for a thyristor tablet / T. Lackner // Journal of electronic materials: -1989. - Vol.18, i.1. - P. 19-24.

10Наумов, 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.

11Гиндин, П.Д. Разработка новых технологий и оборудования на основе метода лазерного управляемого термораскалывания для) обработки деталей лик тприбол приборостроения, микро - и оптоэлектроники: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.11.14 / П. Д. Гиндин; Моск. гос. ун-т приборостр. и информ. – М., 2009. – 44 c.

26