



(51) МПК  
**B23K 26/38** (2006.01)  
**B23K 31/10** (2006.01)  
**C03B 33/02** (2006.01)

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011111424/02, 25.03.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
 25.03.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 25.03.2011

(43) Дата публикации заявки: 27.09.2012 Бюл. № 27

(45) Опубликовано: 10.11.2013 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
 поиске: RU 2224648 C1, 27.02.2004. RU 2404931  
 C1, 27.11.2010. KR 2002088258 A, 27.11.2002.  
 JP 2010201479 A, 16.09.2010. US 20060076105  
 A1, 13.04.2006.

Адрес для переписки:

246019, Республика Беларусь, г.Гомель, ул.  
 Советская, 104, Учреждение образования  
 "Гомельский государственный университет  
 имени Франциска Скорины"

(72) Автор(ы):

**Сердюков Анатолий Николаевич (BY),  
 Шалупаев Сергей Викентьевич (BY),  
 Никитюк Юрий Валерьевич (BY),  
 Шолох Владимир Федорович (BY)**

(73) Патентообладатель(и):

**Учреждение образования "Гомельский  
 государственный университет имени  
 Франциска Скорины" (BY)**

**(54) СПОСОБ РАЗДЕЛЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
 ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к лазерной резке анизотропных материалов, в частности к способу разделения кристаллического кремния, и может быть использовано в электронной промышленности, а также в других областях техники и производства, где существует необходимость прецизионной обработки изделий из кристаллических материалов. Способ включает выбор направления резки относительно кристаллографической ориентации кристаллического кремния, нанесение надреза по линии реза, лазерный нагрев линии реза до температуры, не превышающей температуры релаксации термоупругих напряжений, и локальное охлаждение зоны нагрева в результате перемещения по обрабатываемой

поверхности зон нагрева и охлаждения. Значение модуля Юнга определяют в зависимости от направления резки относительно кристаллографической ориентации кристаллического кремния. Изменяют интенсивность нагрева путем изменения скорости относительного перемещения лазерного излучения и материала и/или мощности лазерного излучения пропорционально модулю Юнга в направлении, перпендикулярном плоскости разделения. В результате формируются лазерно-индуцированные трещины с заданными геометрическими характеристиками при термораскалывании в различных кристаллографических направлениях пластин из кристаллического кремния. 1 з.п. ф-лы, 1 ил.



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
**B23K 26/38** (2006.01)  
**B23K 31/10** (2006.01)  
**C03B 33/02** (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2011111424/02, 25.03.2011**

(24) Effective date for property rights:  
**25.03.2011**

Priority:

(22) Date of filing: **25.03.2011**

(43) Application published: **27.09.2012 Bull. 27**

(45) Date of publication: **10.11.2013 Bull. 31**

Mail address:

**246019, Respublika Belarus', g.Gomel', ul.  
Sovetskaja, 104, Uchrezhdenie obrazovanija  
"Gomel'skij gosudarstvennyj universitet imeni  
Frantsiska Skoriny"**

(72) Inventor(s):

**Serdjukov Anatolij Nikolaevich (BY),  
Shalupaev Sergej Vikent'evich (BY),  
Nikitjuk Jurij Valer'evich (BY),  
Sholokh Vladimir Fedorovich (BY)**

(73) Proprietor(s):

**Uchrezhdenie obrazovanija "Gomel'skij  
gosudarstvennyj universitet imeni Frantsiska  
Skoriny" (BY)**

(54) **METHOD OF CRYSTALLINE SILICON SEPARATION BY THERMOELASTIC STRAINS**

(57) Abstract:

FIELD: process engineering.

SUBSTANCE: invention relates to laser cutting of anisotropic materials and can be used in electronics engineering and other industries that required precise machining of crystalline materials. Proposed method comprises selection of cutting direction along crystalline silicon crystal-lattice [crystallographic] orientation, making the notch along cutting line, laser heating of cutting line to temperature not exceeding that of thermoelastic

strain relaxation and local cooling of heating zone by displacement of heating and cooling zones over processed surface. Young modulus is defined subject to cutting direction relative to said crystal-lattice [crystallographic] orientation. Heating intensity is measured by varying relative displacement of laser radiation and material and/or laser radiation power in proportion with Young modulus perpendicular to separation plane.

EFFECT: efficient and reliable cutting.

2 cl, 1 dwg

RU 2 497 643 C2

RU 2 497 643 C2

Изобретение относится к способам резки анизотропных материалов под действием термоупругих напряжений, в частности к способам лазерного термораскалывания кристаллического кремния.

Изобретение может быть использовано в электронной промышленности, а также в других областях техники и производства, где существует необходимость прецизионной обработки изделий из кристаллических материалов.

Известен способ термораскалывания стекла и других хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений, возникающих в результате лазерного нагрева материала и образования в нем разделяющей трещины [1].

Сущность указанного способа заключается в следующем.

При воздействии на поверхность материала лазерного пучка происходит образование разделяющей трещины, динамика развития которой определяется распределением термоупругих напряжений, сформированных в результате теплового расширения областей материала, подвергшихся локальному лазерному нагреву. При этом разделение материала происходит по всей толщине и характеризуется низкой скоростью термораскалывания.

В рассматриваемом способе увеличение скорости термораскалывания возможно за счет увеличения мощности лазерного излучения. Однако чрезмерное увеличение мощности лазерного излучения приводит к перегреву материала и образованию поперечных трещин вдоль линии обработки, что не позволяет обеспечить высокую точность резки и делает описанный способ практически малоприменимым и бесперспективным.

Известен способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений формируемых в результате лазерного нагрева материала вдоль линии реза до температуры, не превышающей температуры релаксации термоупругих напряжений за счет пластических деформаций, и локального охлаждения зоны нагрева при относительном перемещении обрабатываемой поверхности и зон нагрева и охлаждения [2].

Известный способ обеспечивает высокую точность разделения, нулевую ширину реза, повышение механической прочности получаемых изделий, безотходность и низкую энергоемкость по сравнению с другими способами резки.

Сущность указанного способа заключается в следующем.

В месте воздействия лазерного излучения формируются зона значительных по величине сжимающих напряжений, которую окружает зона растягивающих напряжений. При подаче хладагента на обрабатываемую поверхность возникает дополнительная зона растягивающих напряжений, ограниченная зоной сжимающих напряжений, сформированных лазерным пучком. Инициирование разделяющей трещины происходит в поверхностных слоях материала от дефекта микроструктуры или искусственно нанесенного дефекта в зоне растягивающих напряжений, сформированных за счет подачи хладагента. Далее начальная микротрещина начинает свое движение и распространяется до зоны сжимающих напряжений, сформированных лазерным излучением. После этого нестационарный рост трещины прекращается, и ее дальнейшее движение определяется изменением пространственного распределения зон растягивающих и сжимающих напряжений, обусловленным взаимным перемещением обрабатываемого материала, лазерного пучка и хладагента.

Таким образом, при реализации известного способа распределение сжимающих напряжений в объеме материала определяет форму и глубину развития микротрещины, инициализация и развитие которой происходит в зоне растягивающих

напряжений, сформированных в области подачи хладагента.

Этот способ обработки получил широкое распространение для резки различных изотропных хрупких неметаллических материалов (таких, как различные типы стекол и керамики). Однако этот способ не позволяет осуществлять высококачественную резку монокристаллических материалов, для которых характерна анизотропия свойств.

Наиболее близким к заявляемому является способ разделения анизотропных материалов под действием термоупругих напряжений, включающий выбор направления резки относительно кристаллографической ориентации материала, определение интенсивности нагрева в направлении резки пропорционально коэффициенту линейного термического расширения, нанесение надреза по линии реза, лазерный нагрев линии реза до температуры, не превышающей температуры релаксации термоупругих напряжений и локальное охлаждение зоны нагрева в результате перемещения по обрабатываемой поверхности зон нагрева и охлаждения [3].

Существенным недостатком известного способа является то, что в нем не учитывается влияние анизотропии упругих свойств на процесс лазерного термораскалывания.

Дело в том, что в соответствии с известным способом при лазерном термораскалывании кубических кристаллов, к которым относится кристаллический кремний, не нужно изменять интенсивность нагрева при резке в различных кристаллографических направлениях, так как коэффициент линейного термического расширения в таких кристаллах изотропен.

Однако упругие свойства кубических кристаллов и в частности кристаллического кремния анизотропны и при этом анизотропия этих свойств оказывает существенное влияние на процесс лазерного термораскалывания.

Таким образом, применение известного способа на практике не позволяет осуществлять высококачественную резку кубических кристаллов вообще и пластин из кристаллического кремния в частности.

Техническая задача, решаемая заявляемым изобретением, заключается в повышении качества резки пластин из кристаллического кремния за счет правильного определения технологических параметров лазерного термораскалывания в различных кристаллографических направлениях, учитывающего влияние анизотропии модуля Юнга.

Технический результат, достигаемый заявляемым изобретением, заключается в обеспечении формирования лазерно-индуцированных трещин с заданными геометрическими характеристиками при термораскалывании в различных кристаллографических направлениях пластин из кристаллического кремния.

Технический результат достигается тем, что в способе разделения кристаллического кремния под действием термоупругих напряжений, включающем выбор направления резки относительно кристаллографической ориентации кристаллического кремния, нанесение надреза по линии реза, лазерный нагрев линии реза, до температуры, не превышающей температуры релаксации термоупругих напряжений, и локальное охлаждение зоны нагрева в результате перемещения по обрабатываемой поверхности зон нагрева и охлаждения, дополнительно определяют значение модуля Юнга в зависимости от направления резки относительно кристаллографической ориентации кристаллического кремния и интенсивность нагрева выбирают пропорционально модулю Юнга в направлении перпендикулярном плоскости разделения за счет

изменения скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала и/или изменения мощности лазерного излучения, при этом соотношение скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала и мощности лазерного излучения при лазерном разделении кристаллического кремния выбирают из условия

$$\frac{v}{P} = k \cdot E,$$

где

$v$  - скорость относительного перемещения лазерного пучка и материала, м/с;

$P$  - мощность лазерного излучения, Вт;

$k$  - коэффициент пропорциональности, м/(Па·с·Вт);

$E$  - модуль Юнга в направлении перпендикулярном плоскости разделения, ГПа.

Сущность заявляемого способа разделения пластин из кристаллического кремния под действием термоупругих напряжений заключается в следующем.

Как известно кристаллический кремний обладает анизотропией упругих свойств и в частности модуля Юнга. Поэтому при разделении кристаллического кремния методом лазерного термораскалывания необходимо определять технологические параметры резки в заданном кристаллографическом направлении (в частности, интенсивность нагрева) с учетом значений модуля Юнга обусловленного анизотропией кристаллов кремния.

При этом нужно учитывать, что при лазерном термораскалывании определяющее влияние на формирование лазерно-индуцированной трещины играют напряжения, действующие перпендикулярно плоскости разделения, а величина этих напряжений пропорциональна модулю Юнга в том же направлении.

Величина термоупругих напряжений возникающих при изменении температуры в твердом теле прямо пропорциональна произведению соответствующего коэффициента линейного термического расширения на величину изменения температуры и на величину соответствующего модуля Юнга:

$$\sigma = E\alpha\Delta T,$$

где

$\sigma$  - напряжение, действующее перпендикулярно плоскости разделения;

$\alpha$  - коэффициенты линейного термического расширения в направлении перпендикулярном плоскости разделения;

$E$  - модуль Юнга в направлении, перпендикулярном плоскости разделения;

$\Delta T$  в данном случае равно разности между максимальной температурой в зоне лазерного нагрева  $T_{\max}$  и температурой в зоне воздействия хладагента  $T_{\min}$ .

Также известно, что  $T_{\max}$  обратно пропорциональна скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала и прямо пропорциональна мощности лазерного излучения.

Поэтому для соотношения скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала и мощности лазерного излучения в зависимости от изменения значений модуля Юнга в кубических кристаллах справедливо следующие условие:

$$\frac{v}{P} = k \cdot E,$$

где

$v$  - скорость относительного перемещения лазерного пучка и материала, м/с;

$P$  - мощность лазерного излучения, Вт;

$k$  - коэффициент пропорциональности, м/(Па·с·Вт);

$E$  - модуль Юнга в направлении перпендикулярном плоскости разделения, ГПа.

С учетом существенного отличия модуля Юнга в зависимости от ориентации кристалла кремния при резке в различных направлениях необходимо осуществлять дифференцированный нагрев, обеспечивающий формирование необходимых для создания лазерно-индуцированной трещины термоупругих напряжений в каждом направлении ориентации. Это может быть обеспечено либо за счет изменения скорости резки, либо за счет соответствующего изменения мощности лазерного излучения.

Так, например, в пластине, вырезанной параллельно плоскости (110), модуль Юнга вдоль направления [001] составляет 130,2 МПа, а в направлении [110] перпендикулярном направлению [001] составляет 168,9 МПа [4].

При этом экспериментально было установлено, что скорость резки кремниевой пластины толщиной 460 мкм при постоянной мощности лазерного излучения  $P=80$  Вт в направлении [001] составляет 42 мм/с, а в направлении  $[1 \bar{1} 0]$  скорость резки составляет 35 мм/с.

Сопоставительный анализ заявляемого решения с прототипом показывает, что заявляемый способ отличается от известного осуществлением нового действия и выбранным условием, при котором выполняют действия, характеризующие заявляемый способ, и не является частью уровня техники.

Таким образом, заявляемый способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений является новым и имеет изобретательский уровень.

Заявляемый способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений является промышленно применимым, так как в случае его осуществления с помощью технических средств, известных в данной области техники, возможна реализация указанной области назначения.

Сущность изобретения поясняется фигурой, на которой представлена схема образования надреза с помощью лазерного пучка и хладагента в кристаллическом кремнии.

Заявляемый способ разделения кристаллического кремния под действием термоупругих напряжений осуществляют следующим образом.

В начале осуществления способа определяют выбор направления резки относительно кристаллографической ориентации образца.

Далее определяют соотношение скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала и мощности лазерного излучения выбирают из условия:

$$\frac{v}{P} = k \cdot E,$$

предварительно определив значение модуля Юнга  $E$  в направлении, перпендикулярном плоскости разделения по методике, изложенной в [4].

Далее наносят предварительный надрез на обрабатываемой поверхности в начале контура обработки. Нагревают пластину из кристаллического кремния 1 с помощью лазерного пучка 2 до температуры, не превышающей температуры релаксации термоупругих напряжений и локально охлаждают зону нагрева хладагентом 3 в результате перемещения по обрабатываемой поверхности зон нагрева и охлаждения. При этом под действием формируемых термоупругих напряжений образуется трещина 4 (фиг.1).

Ниже приведены конкретные примеры.

В качестве материала использовали пластины кристаллического кремния

толщиной 460 мкм. В качестве средства перемещения был использован двухкоординатный стол с ходом перемещения 500×500 мм, обеспечивающий скорость перемещения в диапазоне от 0 до 100 мм/с. Для резки был использован АИГ-лазер с длиной волны излучения 1,06 мкм и с регулируемой мощностью от 0 до 100 Вт.

Лазерное излучение фокусировали при помощи сферической оптики в пучок круглого сечения диаметром 1 мм.

При этом экспериментально было установлено, что скорость резки кремниевой пластины толщиной 460 мкм вырезанной в плоскости (110) при постоянной мощности лазерного излучения  $P=80$  Вт в направлении [001] составляет 42 мм/с, а в направлении  $\begin{bmatrix} 1 & \bar{1} & 0 \end{bmatrix}$  скорость резки составляет 35 мм/с.

Так же экспериментально установлено, что скорость резки кремниевой пластины толщиной 460 мкм вырезанной в плоскости (100) при постоянной мощности лазерного излучения  $P=80$  Вт в направлениях [001] и [010] составляет 35 мм/с.

Значение коэффициента  $k$  с учетом вышеперечисленных параметров составило  $3 \cdot 10^{-6}$  м/(Па·с·Вт).

Для сравнения было осуществлено разделение аналогичных образцов по способу, изложенному в прототипе. В ходе экспериментов было определено, что реализация процесса по способу, изложенному в прототипе, на практике приводит к ошибочному выбору технологических параметров лазерного термораскалывания и не позволяет осуществлять высококачественную резку пластин из кристаллического кремния.

Анализируя результаты проведенных экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что предлагаемый способ разделения пластин из кристаллического кварца под действием термоупругих напряжений обеспечивает возможность формирования лазерно-индуцированных трещин с заданными одинаковыми геометрическими характеристиками при термораскалывании в различных кристаллографических направлениях пластин из кристаллического кремния.

Источники информации

1. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. М.: Сов. Радио, 1979, с.48-67.
2. Патент РФ №2024441, МПК С03В 33/02, опубл. 1994.
3. Патент РФ №2224648, МПК С03В 33/00, опубл. 2004 - прототип.
4. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь. 1982. 240 с.

#### Формула изобретения

1. Способ разделения кристаллического кремния под действием термоупругих напряжений, включающий выбор направления резки относительно кристаллографической ориентации кристаллического кремния, нанесение надреза по линии реза, лазерный нагрев линии реза до температуры, не превышающей температуру релаксации термоупругих напряжений, и локальное охлаждение зоны нагрева в результате перемещения по обрабатываемой поверхности зон нагрева и охлаждения, отличающийся тем, что дополнительно определяют значение модуля Юнга в зависимости от направления резки относительно кристаллографической ориентации кристаллического кремния, а интенсивность нагрева изменяют путем изменения скорости относительного перемещения лазерного излучения и материала и/или мощности лазерного излучения пропорционально модулю Юнга в направлении, перпендикулярном плоскости разделения.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что соотношение скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала и мощности лазерного излучения при

лазерном разделении кристаллического кремния выбирают из условия

$$\frac{v}{P} = k \cdot E,$$

- 5 где  $v$  - скорость относительного перемещения лазерного пучка и материала, м/с;  
Р - мощность лазерного излучения, Вт;  
к - коэффициент пропорциональности, равный  $3 \cdot 10^{-6}$  м/(Па·с·Вт);  
Е - модуль Юнга в направлении, перпендикулярном плоскости разделения, ГПа.

10

15

20

25

30

35

40

45

50



