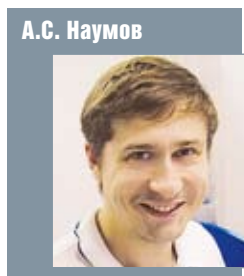


УДК 621.373.8

ЛАЗЕРНОЕ УПРАВЛЯЕМОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО МАСШТАБА

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



В.С. Кондратенко, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, лауреат Премий Совмина СССР и Правительства РФ, лауреат Прохоровской премии, Почетный изобретатель г. Москвы, действительный член академий АИН РФ, РАЕН, АТН РФ

В.В. Минаев, канд. физ.-мат. наук, действительный член АТН РФ, доцент

А.С. Наумов, канд. техн. наук, докторант

Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), кафедра «Инновационные технологии в приборостроении, микро- и оптоэлектронике»

vsk1950@mail.ru

Работа посвящена развитию новых возможностей Hi-Tech за счет применения кластера новых российских методов и технологий лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ), получивших в последнее время широкое распространение и признание во всем мире. Описаны некоторые наиболее значимые применения методов ЛУТ в России и за рубежом при обработке материалов и деталей в машиностроении, приборостроении, микро- и оптоэлектронике.

Ключевые слова: лазерное управляемое термораскалывание (ЛУТ); стекло; сапфир; кремний.

The work is devoted to development of new opportunities Hi-Tech at the expense of application cluster of new Russian methods laser controlled thermocracking (LCT), received recently wide circulation and recognition all over the world. Some are described most important of application of methods LCT in Russia and abroad at processing materials and details in mechanical engineering, instrument making, microelectronics and optoelectronics.

Key words: Laser controlled thermocracking (LCT); Glass; Sapphire; Silicon.

Введение

В последнее десятилетие бурное развитие и применение в различных областях науки и технологий получил метод лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) широкого класса хрупких неметаллических материалов, впервые разработанный и запатентованный в СССР [1], а затем за рубежом [2]. Доля использования таких хрупких материалов как стекло, сапфир, керамика, кварц, кремний и другие полупроводниковые материалы резко возрастает практически во всех отраслях производства. Также резко растет номенклатура изделий, использующих указанные выше материалы.

К ним относятся изделия остекления транспортных средств и стеклоизделия архитектурного назначения, изделия твердотельных полупроводниковых приборов, оптики, микро- и оптоэлектроники. Существующие традиционные технологии обработки перечисленных хрупких неметаллических материалов, а именно, размерной резки и обработки поверхности практически исчерпали свои возможности и требуют своего качественного изменения. Целью данной работы явилась разработка принципиально новых высокоэффективных технологий и современного технологического оборудования для прецизионной

обработки стекла и других многофункциональных материалов на основе метода ЛУТ.

Основные области применения метода ЛУТ

- резка плоских дисплейных панелей (ПДП);
- резка сенсорных и защитных экранов для бытовой электроники;
- резка стекла в процессе выработки;
- резка изделий остекления транспортных средств;
- резка стеклоизделий архитектурного назначения;

- резка монокристаллического кварца и стекла для оптических фильтров;
- резка приборных пластин из сапфира на кристаллы;
- резка различных типов керамики;
- резка кремния и других полупроводниковых материалов;
- лазерное снятие фасок;
- резка стеклянных труб;
- резка выдувных стеклянных изделий.

Основные преимущества метода ЛУТ

- безотходность процесса;
- высокая чистота процесса, не загрязняющего поверхность материала при резке;
- нулевая ширина реза;
- наиболее низкие энергетические затраты процесса;
- высокая скорость резки, достигающая до 2 метров в секунду;
- высокая точность раскроя материалов;
- возможность лазерного притупления острых кромок;
- повышение механической прочности изделий до 5 раз.

Физическая и математическая модели процесса ЛУТ

Сущность метода ЛУТ заключается в следующем (рис. 1). При нагреве поверхности хрупкого материала 1 лазерным пучком 2 (с длиной волны, для которой материал является непрозрачным), фокусируемым объективом 3, в зоне нагрева в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия. При подаче с помощью форсунки 4 хладагента 5 вслед за воздействием лазерного пучка происходит резкое локальное охлаждение поверхности материала по линии реза. Создаваемый градиент температур обуславливает возникновение в поверхностных слоях материала напряжений растяжения, которые при определенных условиях могут превысить

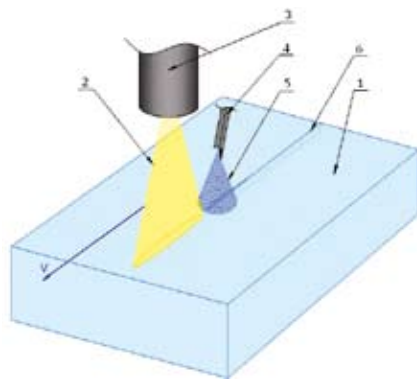


Рис. 1. Схема образования микротрещины в процессе ЛУТ:
1 — обрабатываемая пластина, 2 — лазерный пучок, 3 — фокусирующий объектив, 4 — форсунка, 5 — хладагент, 6 — микротрещина

предел прочности материала, что приводит к образованию микротрещины 6.

Для управления параметрами процесса ЛУТ помимо скорости относительного перемещения материала и лазерного пучка необходимо учитывать влияние следующих параметров:

1. Свойства материала: механические (хрупкость, прочность, состояние поверхности); теплофизические (КЛТР — коэффициент линейного термического расширения, температура плавления, теплоемкость, температуропроводность, термостойкость); оптические (коэффициенты поглощения, пропускания и отражения).

2. Параметры лазерного излучения: длина волны излучения; модовая структура излучения; поляризация излучения; импульсно-периодические свойства излучения; мощность и плотность мощности излучения; форма и размеры пучка на поверхности материала.

3. Параметры хладагента: теплофизические свойства, в том числе теплоемкость, удельная теплота парообразования, температура кипения; количество хладагента и интенсивность его подачи; форма и размеры потока хладагента на поверхности материала.

4. Дополнительное воздействие на материал: создание первичного концентратора напряжений; тепловое воздействие на материал; воздействие акустических волн.

С целью оптимизации режимов была разработана математическая модель ЛУТ для изотропных материалов [3]. Был проведен расчет термоупругих напряжений, возникающих в процессе ЛУТ как изотропных, так и анизотропных материалов [4].

Расчет распределения температуры при поверхностном нагреве лазерным пучком эллиптической формы тонкой приборной пластины был применен метод разделения переменных. Таким образом, задача теплопроводности сведена к одномерной в направлении толщины пластины и двумерной в плоскости пластины. Одномерная задача для поглощения излучения по закону Буггера решается аналитически и выражается рядом Фурье по $\cos(\pi n z/h)$, где z — текущая координата, h — толщина пластины, n — натуральное целое число. Для каждого значения n определена двумерная задача, которая решается численно, методом конечных разностей. Решение задачи проведено средствами MathCad.

Коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально, в расчетах он аппроксимирован зависимостью

$$h(T) = hm \cdot \exp\left(-\frac{(T - T_m)^2}{\Delta T^2}\right).$$

Полученное распределение температуры представлено на рис. 2. В распределении температуры образуется резкий спад в месте фронта кипения хладагента.

При рассмотрении задачи термоупругости тонкой пластины, нагреваемой лазерным излучением и охлаждаемой вслед за пучком хладагентом, можно считать распределение температуры по толщине пластины однородным. В этом случае реализуется плоское напряженное состояние.

Для двумерного случая (x, y) задачу термоупругости определяют уравнения совместности:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{xx} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial x^2} + \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T + \\ + \frac{\alpha E}{1+\nu} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0; \\ \Delta \sigma_{xy} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial x \partial y} + \frac{\alpha E}{1+\nu} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} = 0; \\ \Delta \sigma_{yy} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial y^2} + \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T + \\ + \frac{\alpha E}{1+\nu} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0; \end{aligned}$$

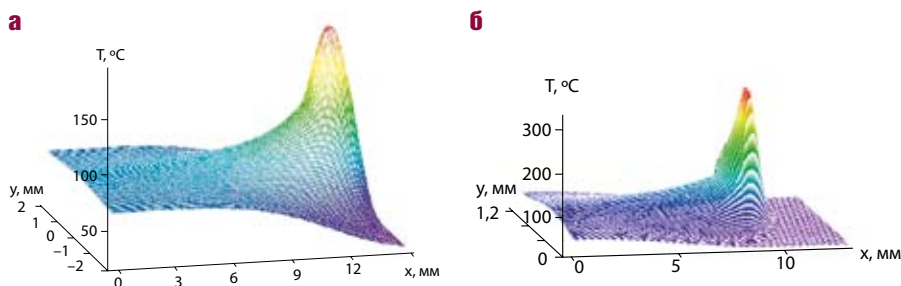


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности кремниевой (а) и сапфировой (б) пластины в процессе термораскалывания

уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0$$

и граничные условия:

$$\sigma_{xx}(-\infty, y) = \sigma_{xx}(\infty, y) = 0;$$

$$\sigma_{yy}(x, -\infty) = \sigma_{yy}(x, \infty) = 0,$$

где α_T — коэффициент термического расширения, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона, σ_{ij} — тензор напряжений, $T(x, y, t)$ — распределение температуры в рассматриваемом материале, причем, для задачи термоупругости время t является параметром, а не переменной.

Введем функцию напряжений $F(x, y)$, удовлетворяющую соотношениям:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \sigma_{yy}; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \sigma_{xx};$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\sigma_{xy}.$$

Тогда уравнения равновесия удовлетворяются автоматически, а уравнения совместности сведутся к уравнению:

$$\nabla^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \frac{\alpha E}{1-\nu} \nabla^2 T = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \nabla^2 \nabla^2 F + \frac{\alpha E}{1-\nu} \nabla^2 T = 0.$$

Частное решение этого уравнения, предложенное Гудьером, находится в виде: $F^*(x, z) = \alpha_T \int_0^1 T(x, z, \tau) d\tau$, используя уравнение теплопроводности с поверхностными источниками нагрева и охлаждения

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha_T \nabla^2 T = 0.$$

Тогда частное решение для компонент σ_{yy} тензора напряжения запишется

$$\sigma_{yy} = \frac{\alpha T E \alpha_T}{1-\nu} \int_0^1 \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} d\tau.$$

Общее решение для задачи термоупругости будет тождественно равно нулю, поскольку при отсутствии нагрева и охлаждения в свободно расположенной пластине напряжений нет.

Таким образом, нас интересует значение σ_{yy} в зоне охлаждения после нагрева излучением пластины. Именно эти напряжения приводят к продвижению трещины вслед за лазерным пучком.

Определенное таким образом распре-

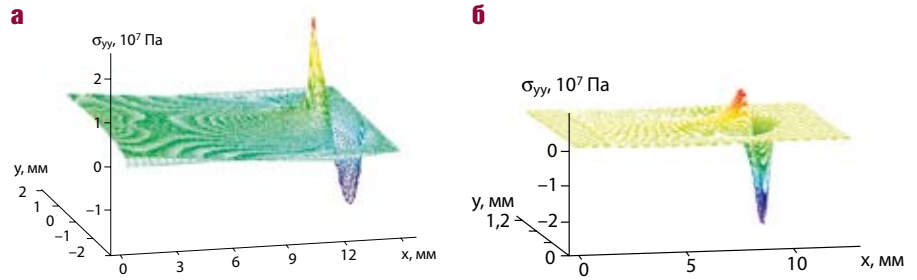


Рис. 3. Распределение напряжения σ_{yy} на поверхности кремниевой (а) и сапфировой (б) пластины в процессе термораскальвания

деление напряжений σ_{yy} приведено на рис. 3.

Приведенная математическая модель показывает взаимосвязь различных параметров процесса лазерного управляемого термораскальвания тонких приборных пластин. Полученные расчеты согласуются с экспериментальными результатами.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЛУТ

Резка дисплейных панелей

Впервые в мире метод ЛУТ был промышленно реализован в НПО «Интеграл» (г. Минск) на установке дРМЗ.104.024 при резке жидкокристаллических индикаторов ещё в 1978 г. Максимальный размер исходной стеклянной заготовки толщиной 0,5–1 мм составлял 300 x 400 мм².

Впоследствии, после международного патентования, крупные компании из Японии, США и Южной Кореи стали успешно применять этот метод для резки дисплейных панелей от 5 до 8 уровней [3].

Установка для резки дисплейных панелей 6-го поколения «Laser 6G LCD Glass Cutter M/C 1» (рис. 4) предназначена для раскроя групповой панели размером 1850 x 1500 мм на отдельные модули.

Резка сенсорных и защитных экранов для бытовой электроники

Производство дисплейных панелей, сенсорных и защитных экранов для бытовой электроники предполагает осуществление конечных технологических операций сборки и резки в так называемых «чистых комнатах» с повышенными требованиями к чистоте и вакуумной гигиене. Операция резки методом лазерного управляемого термораскальвания обеспечивает такие условия из-за безотходности процесса резки.

Однако, как правило, после резки необходимо осуществлять притупление острых кромок полученных дисплейных панелей или защитных стекол для дис-

плейных панелей, для чего полученные изделия подвергают снятию фаски для притупления острой кромки. Традиционная технология притупления кромок основывается на применении алмазно-абразивного инструмента. К основным недостаткам данной технологии притупления острых кромок изделий относятся:

- загрязнение изделий продуктами шлифования, что требует дополнительной операции очистки поверхности изделий после снятия фаски;
- снижение механической прочности изделия за счет появления микротрещин и нарушенного слоя в зоне обработки;
- низкая культура производства;
- низкая производительность;
- большой расход алмазно-абразивного инструмента.

Для решения этих проблем был разработан новый способ притупления острых кромок изделий из хрупких неметаллических материалов с помощью лазерного излучения методом ЛУТ [5], заключающийся в следующем. При нагреве кромки заготовки стекла лазерным пучком эллиптического сечения в поверхностных слоях кромки возникают напряжения сжатия, в то время как во внутренних слоях возникают компенсирующие их напряжения растяжения, приводящие к отделению узкой полоски стекла с заданными размерами.

На рис. 5 показан общий вид лазерного технологического комплекса для обработки стекла в производстве дисплейных панелей.

В качестве примера на рис. 6 представлена фотография вырезанного экрана i-Pod с элементом отделенной фаски методом ЛУТ.

Резка приборных пластин на кристаллы

Большинство современных твердотельных приборов — транзисторов, диодов, светодиодов, лазеров, фотоприемников,



Рис. 4. Установка для резки дисплейных панелей 6-го поколения «Laser 6G LCD Glass Cutter M/C 1»



Рис. 5. Общий вид лазерного технологического комплекса для резки и снятия фаски в производстве дисплейных панелей

Технические характеристики установки технологического комплекса для резки и снятия фаски

• мощность лазерного излучения для резки	50–150 Ватт
• мощность лазерного излучения для снятия фаски	100–200 Ватт
• режим работы обоих лазеров	непрерывный
• длина волны излучения	10,6 мкм
• рабочий ход стола, не менее:	
по координате «X»	1000 мм
по координате «Y»	800 мм
• точность позиционирования, не более	0,010 мм
• угол поворота объективов	0...360°
• диапазон скорости резки	50...500 мм/сек
• точность габаритных размеров вырезанной пластины	± 0,020 мм
• размер установки L x W x H	2400 x 1800 x 2200 мм
• масса установки	4800 кг
• потребляемая мощность	20 кВт

датчиков, фильтров, сенсоров и других изделий изготавливаются по групповой технологии. Это означает, что на одной подложке из различных материалов, в частности, сапфира, карбида кремния, кремния, арсенида галлия и др. формируют функциональные структуры, которые в дальнейшем разделяют на отдельные кристаллы. После разделения кристаллы упаковывают в корпуса для получения готовых приборов. Традиционным методом разделения пластин на кристаллы является механическое скрайбирование, которое в последнее время для некоторых материалов заменяется лазерным скрайбированием. Недостатками обоих методов разделения является наличие двух стадий разделения — скрайбирования матери-

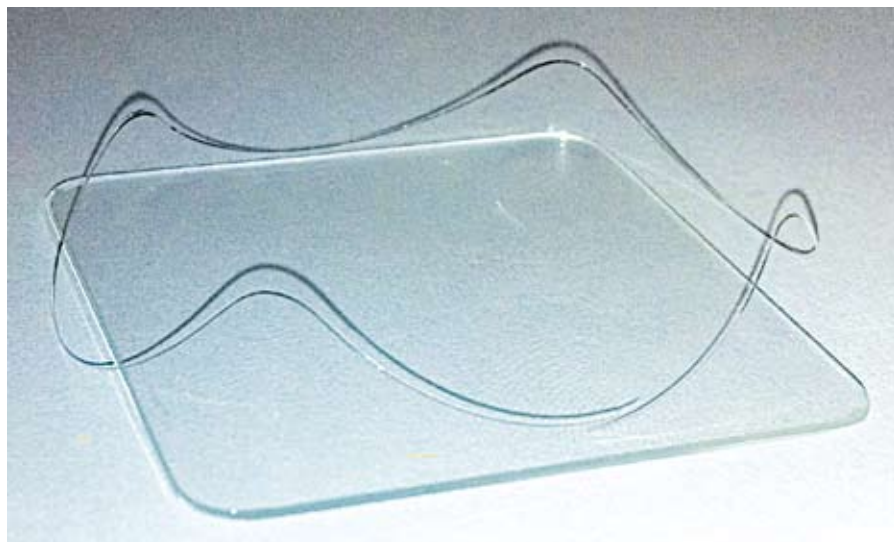


Рис. 6. Фотография вырезанного экрана i-Pod с элементом отделенной фаски методом ЛУТ

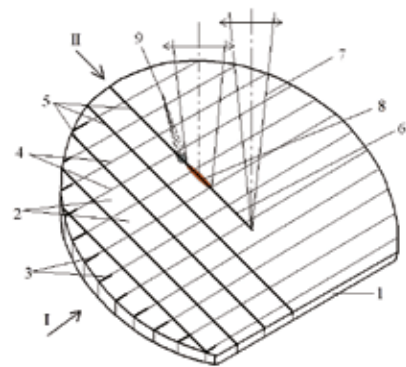


Рис. 7. Схема лазерной резки приборных пластин на кристаллы методом ЛУТ

ала по линии разделения и последующего механического разламывания, а также низкое качество реза.

В ходе выполнения исследовательских работ по оптимизации технологического процесса лазерной резки приборных пластин, в первую очередь, на основе сапфировых подложек был разработан и запатентован новый способ резки [6].

На рис. 7 представлена схема лазерной резки приборных пластин на кристаллы, сочетающей метод ЛУТ и нанесение неглубокого надреза во втором направлении с помощью УФ-лазера.

Резку сапфировой пластины 1 со сформированными структурами 2 осуществляют следующим образом. При резке пластины в первом направлении I первоначально на краю пластины наносят короткие надрезы 3, являющиеся концентраторами напряжений и обеспечивающие надежное зарождение и продвижение разделяющих трещин 4 методом ЛУТ. При резке во втором направлении II для получения сквозных разделяющих трещин 5 предварительно наносится неглубокий надрез 6 по всей длине реза или в местах пересечений с линиями реза 4 с помощью сфокусированного пучка УФ-лазера 7. При последующем нагреве линии надреза 6 лазерным пучком 8 CO_2 -лазера и последующего охлаждения зоны нагрева с помощью хладагента 9 происходит образование сквозной разделяющей трещины 5.

Осуществлена оптимизация технологических режимов резки приборных пластин со структурами светоизлучающих диодов (СИД) на кристаллы. В качестве материала использовалась пластина из сапфира диаметром 50,8 мм, толщиной 90 мкм. Резку подложки на кристаллы (чипы) размерами 250 x 250 мкм² осуществляли на лазерной технологической установке,

содержащей CO_2 -лазер мощностью до 50 Вт, обеспечивающей генерацию излучения с модой TEM_{01} . Излучение фокусировалось на поверхность пластины с помощью сферическо-цилиндрического объектива в эллиптический пучок размером 1,5 x 0,1 мм². Для нанесения локальных надрезов длиной 150 мкм на краю пластины при резке в первом направлении и нанесения надрезов по всей длине реза во втором направлении использовали УФ-лазер с длиной волны излучения 355 нм. Глубина надреза составляла 12 мкм, а ширина надреза — 7 мкм. Скорость резки пластины методом ЛУТ составила 400 мм/сек.

На рис. 8 представлена фотография линии реза 1 пластины в первом направлении с помощью ЛУТ CO_2 -лазером и линии реза 2 во втором направлении с предварительным надрезом УФ-лазером.

На рис. 9 представлена фотография торца кристалла СИД после надреза УФ-лазером и последующего ЛУТ CO_2 -лазером.

Таким образом, способ резки приборных пластин из хрупких материалов при выполнении указанных выше условий позволяет повысить эффективность способа резки за счет обеспечения возможности сквозной резки, не требующей

дополнительной операции разламывания, расширить диапазон резки приборных пластин по толщине подложек и расширить возможность эффективной резки кристаллов практически любых размеров, а также повысить производительность и качество резки.

Помимо указанных достоинств разработанного метода резки приборных пластин, при использовании данного способа существенно улучшается один из важнейших параметров светодиодов, к которым относится их яркость. Метод ЛУТ позволяет достигать большей яркости светодиодов, чем после резки другими методами. Достигается это за счет отсутствия каких-либо дефектов вдоль первого направления реза и незначительной (10 мкм) глубины канавки вдоль второго направления реза. Наличие глубокой канавки (25–30 мкм) после скрайбирования УФ-лазером в торце светодиода вызывает поглощение части света поврежденными кромками. Чем глубже повреждение, тем меньше яркость.

Выводы

Выполненный комплекс работ по фундаментальным и прикладным исследованиям метода ЛУТ свидетельствует о конкурентоспособности российской научной школы в области высоких технологий.

Библиография

1. А.С. СССР № 708686. Способ резки стекла / В.С. Кондратенко. Приор. 17.08.1977.
2. Patent № WO9320015. Splitting of non-metallic materials / V.S. Kondratenko. 1993-10-14.
3. Кондратенко В.С., Борисовский В.Е., Гиндин П.Д., Сек-Джун Ли, Наумов А.С. Разработка технологии лазерного управляемого термораскалывания плоских дисплейных панелей // Приборы. № 4(58). 2005. С. 35–38.
4. Кондратенко В.С., Борисовский В.Е., Гиндин П.Д., Колесник В.Д., Сорокин А.В. Российские высокие технологии в производстве приборов микро- и оптоэлектроники // Интеграл. № 6. 2008. С. 8–9.
5. Патент РФ № 2163226, МКИ С 03 В 33/02. Способ притупления острых кромок изделий (Варианты) / В.С. Кондратенко. 2000.
6. Патент РФ № 2404931, МКИ⁵ С03 В 33/09. Способ резки пластин из хрупких материалов / В.С. Кондратенко, А.С. Наумов; Заявл. № 2009132338/03 от 28.08.2009; Оpubл. 27.11.2010, Б.И. № 33.

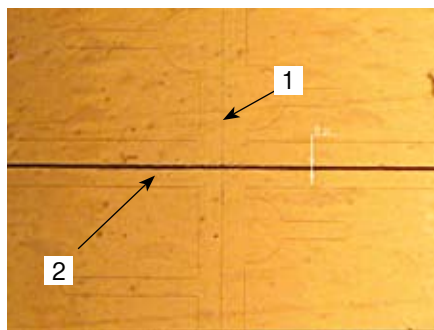


Рис. 8. Фотография линии реза 1 пластины в первом направлении с помощью ЛУТ CO_2 -лазером и линии реза 2 во втором направлении с предварительным надрезом УФ-лазером

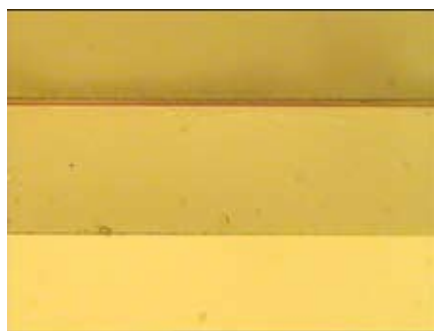


Рис. 9. Фотография торца кристалла СИД после надреза УФ-лазером и последующего ЛУТ CO_2 -лазером