

Современные методы и оборудование для резки приборных пластин на кристаллы (обзор)

В. И. Иванов, В. С. Кондратенко

Спрос на производство различных изделий микро- и оптоэлектроники на кристаллах (чипах) из полупроводниковых материалов с низким уровнем потребительской стоимости ужесточает требования к высокой точности и улучшению качества их обработки и подразумевает необходимость рассмотрения эффективных методов резки приборных пластин. В данной работе рассмотрены высокоэффективные методы резки пластин на кристаллы, позволяющие обрабатывать сложные и дорогостоящие устройства. Авторами обосновывается и экспериментально доказывается эффективность применения метода лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ), приведены преимущества и результаты успешного внедрения метода ЛУТ для прецизионной резки стекла, кремния, сапфира и других хрупких неметаллических материалов.

Ключевые слова: микроэлектроника; обработка полупроводниковых материалов; резка пластин на кристаллы; лазерное управляемое термораскалывание (ЛУТ).

Введение

Тенденции развития науки и инноваций в России во многом направлены на исследования и разработки в сфере микро- и нанотехнологий, а также внедрение их результатов в производство.

Современная электроника быстро развивается, что приводит к уменьшению размеров приборных и технологических объектов. Микро- и нанотехнологии напрямую касаются способов изготовления микро- и нанообъектов, которые минимум в одном измерении имеют размеры не более 100 мкм или 100 нм соответственно. Для производства электроники на основе микро- и нанотехнологии применяются хорошо зарекомендовавшие себя материалы и новые материалы, обладающие широкими возможностями получения контролируемых и выгодных физико-химических свойств для конкретных применений.

Традиционные материалы подложек для производства полупроводниковых устройств, являются хрупкими, а нанесенные на них структуры из-за физических свойств усложняют последующие технологические процессы производства. Кроме того, сложность работы с тонкими устройствами дает толчок для повышения доходности путем разработки все более сложных структур и оптимизации применения полезной площади полупроводниковой пластины.

В настоящее время основные методы разделения пластин на кристаллы базируются на механической и лазерной резке: алмазное скрайбирование с последующим разламыванием; резка алмазным диском с внешней режущей кромкой; лазерное скрайбирование с последующим разламыванием; резка лазером и т. п.

В данной статье будет проведен обзор и проанализированы методы резки пластин из неметаллических материалов на кристаллы. Представлены результаты исследований качества кристаллов. Особое внимание будет уделено методу лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) [1–4] и его внедрению в производство различных изделий электроники [5].

Анализ существующих методов и оборудования для резки пластин на кристаллы

В первую очередь рассмотрим алмазное скрайбирование с последующим разламыванием и резку алмазным диском с внешней режущей кромкой.

Иванов Владимир Игоревич^{1,2}, аспирант,
зам. главного технолога.

Кондратенко Владимир Степанович¹, зав. кафедрой, д.т.н.,
профессор.

¹ Московский технологический университет МИРЭА.

Россия, 107996, Москва, ул. Стрмынка, 20.

Тел. (499) 268-02-96.

E-mail: vsk1950@mail.ru

² ООО «Технологии органической и печатной электроники».

Россия, 107497, Москва, Щелковское ш., 77.

E-mail: ivi061@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.

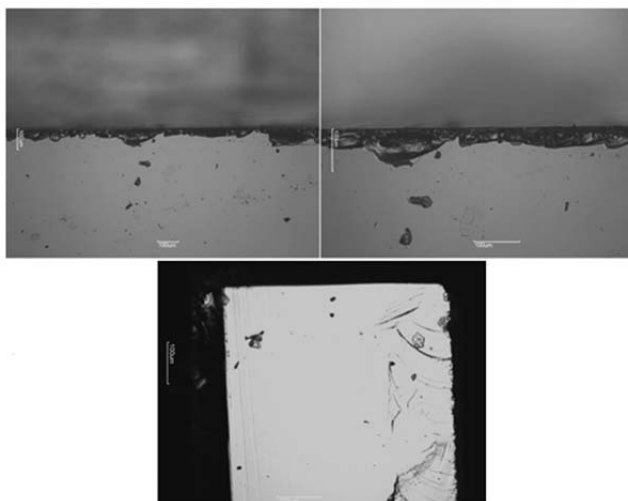
© Иванов В. И., Кондратенко В. С., 2018

Механическое скрайбирование полупроводниковых пластин не изменялось на протяжении последних лет [6]. Качественное скрайбирование делают резцами, изготовленными из натурального алмаза, имеющими наибольшую износостойкость. Резец может быть исполнен в виде ролика, но самая распространенная форма режущей части – это трёхгранная и усеченная четырёхгранная пирамиды, причем режут именно ребра пирамиды, они используются попеременно для нанесения надрезов. Применение метода механического скрайбирования ограничено таким критерием, как коэффициент концентрации напряжений k , который определяет максимальное напряжение изгиба на поверхности за счет приложенного изгибающего момента. Его можно рассчитать по формуле:

$$k = (0,355(t-d)/r) + 0,85 / 2 + 0,08 \quad (1)$$



а



б

Рис. 1. Оборудование для механического скрайбирования (а) и кромки кристаллов, полученных при скрайбировании (б).

Резка алмазным диском – это наиболее простой и легко осуществимый способ резки пластин в производстве. Для разрезания пластин на кристаллы, когда глубина реза не превышает 1,5 мм, успешно используют алмазные диски с внешней режущей кромкой [7]. Иногда используют наборы дисков с расстоянием между ними, равным размеру отрезаемого кристалла, или установки с двумя шпинделями. Толщины дисков разнятся от 0,02 мм (20 мкм) до 0,32 мм (320 мкм) в зависимости от конкретных задач. Резка алмазным диском претендует на достижение 20 мкм ширины пропила. Однако более регулярно производится пропил шириной в 250 мкм, качество которого зависит от ряда факторов: материала лезвия, зернистости алмазных зерен и их концентрации, скорости вращения и подачи лезвия.

где r – размер алмазного зерна; d – глубина реза; t – толщина пластины.

Очевидно, чем толще пластина, тем требуется большее напряжение изгиба. Для уменьшения требуемого напряжения изгиба можно увеличить глубину риски, но в этом случае возрастает дефектность вдоль линии реза, и возможен неконтролируемый раскол материала из-за увеличения давления на инструмент для скрайбирования. Также можно увеличить размер алмазного зерна, но это, в свою очередь, отразится на качестве кромок кристаллов и их механической прочности.

Оборудование для механического скрайбирования и разделения полупроводниковых пластин (см. рис. 1) производят, например, во Франции компании JFP Microtechnic и Cefori, на Тайване – Ai Po Li Industrial Co., Ltd., в Великобритании – Loadpoint Ltd., а также многие другие компании из разных стран.

Недостатком резки диском с наружной алмазной режущей кромкой является невысокая жесткость инструмента G , зависящая в основном от соотношения его размеров (толщины и внешнего диаметра) [4]. Она связана с основными технологическими факторами соотношением:

$$G = K_m \times W^m / V_{рез}^n \quad (2)$$

где K_m – коэффициент, характеризующий материал; W – количество оборотов; $V_{рез}$ – скорость резки; m, n – постоянные величины.

Один из вариантов повышения жесткости инструмента – применение толстой основы режущего диска, но при этом возрастает ширина пропила и растут потери материала. Другой вариант повысить жесткость – это увеличить скорость вращения

режущего диска. При этом возникают центробежные силы, которые и придают ему дополнительную жесткость. Но при возрастании числа оборотов возникают вибрации режущей кромки диска, и интенсификация гидромеханических процессов вызывает увеличение количества и размеров дефектов в зоне реза.

Оборудование и оснастку для разрезания пластин на кристаллы алмазными дисками с внешней режущей кромкой (см. рис. 2) производят ЗАО «НПП «ЭСТО» (Россия), ГНПО «ПЛАНАР» (Беларусь), Loadpoint, Ltd (Великобритания), Advanced Dicing Technologies (ADT) (Израиль), DISCO (Япония), ACCRETECH (Япония) и др.



Рис. 2. Оборудование для дисковой резки (а), процесс резки и кромки кристаллов (б).

Лазерные методы скрайбирования и резки пластин на кристаллы являются развивающимися по сравнению с механическими методами. По мере того как пластины становятся больших размеров и диаметров, а лазеры дешевле и мощнее, их эксплуатационные преимущества резко возрастают.

Рассмотрим ряд исследований по лазерной резке пластин при помощи лазеров с излучениями в различных диапазонах длин волн [8, 9], с разной шириной импульса (от фемто- и пико- до наносекундного режимов [10–13]) и разной мощности. Ни в одной из этих работ не рассматривают резку приборных пластин толщиной свыше 200–300 мкм. Установлено, чем выше частота импульсов, тем выше скорость резания из-за увеличения распределения энергии в материале. Но увеличение глубины абляции на каждый импульс приводит к таким термическим влияниям, как плавление, расстрескивание, аморфизация и накопление остаточных напряжений. При разделении пластин на кристаллы эти термические влияния приводят к снижению прочности кристалла и вызывают повреждение тонких пленок и чувствительной электроники на нем.

При скрайбировании лазером ширина реза достигает значений 4–30 мкм в зависимости от источника излучения, оптики и других вспомога-

тельных систем. Скорость составляет в среднем 2–50 мм/с, она напрямую зависит от свойств обрабатываемого материала, его толщины и других параметров. На рис. 3 представлено оборудование для лазерного скрайбирования и лазерной резки неметаллических материалов фирмы Disco Corp. (Япония).

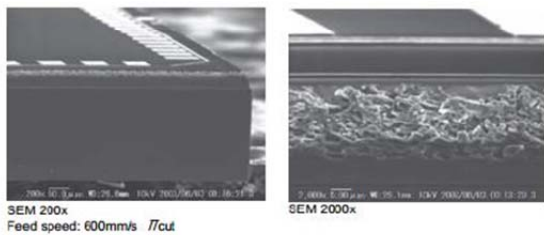
Одна из последних технологий использует лазер, чтобы вызвать контролируемое разрушение материала с помощью теплового удара. Так называемый метод «невидимой резки», разработанный и запатентованный 11 лет назад японской фирмой Hamamatsu (Япония), показал большие перспективы для практического применения при резке пластин на кристаллы. Этот метод заключается в фокусировке частично прозрачного лазерного пучка чуть ниже поверхности пластины внутри материала, чтобы вызвать контролируемое разрушение материала в планируемом направлении. При достаточной плотности мощности внутри материала образуется линия микротрещин, точечных дефектов, схожих с теми, которые делают при лазерной 3D-маркировке в стеклянных заготовках для сувениров (рис. 4). После нанесения внутренних дефектов, как и в любом методе скрайбирования, необходима операция докальвания.



Application example

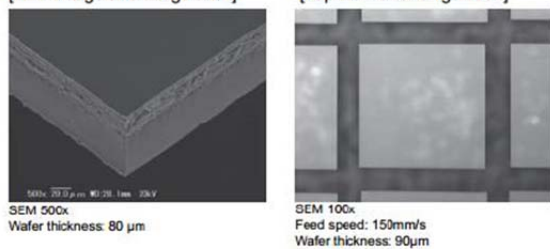
Low-k grooving

- Inhibits delamination (film peeling)



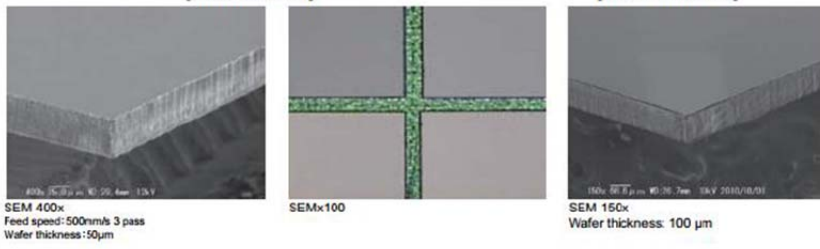
Sapphire grooving

- Realizes stable processing while suppressing sapphire brightness deterioration
 - Improves CoO with a shape recognition function for broken wafers, and with multiple-mounted wafer processing
- [SEM image after singulation] [Top view after singulation]



Laser full cut

- Increases the number of die per wafer through street width reductions
 - Improved feed speed (compared to blade dicing)
- [Si wafer full cut] [SiC wafer full cut]



Si+DAF full cut

- High quality cutting of DAF (Die Attach Film)

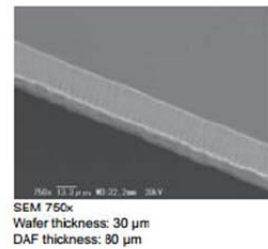


Рис. 3. Оборудование для лазерного скрайбирования и лазерной резки неметаллических материалов и кромки кристаллов.

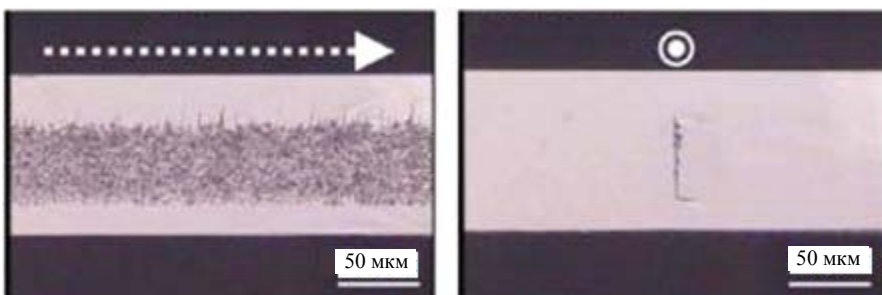


Рис. 4. Линия микротрещин внутри пластины при «невидимой резке» по двум направлениям.

В принципе, метод «невидимой резки» позиционируется как идеальное решение для резки пластин на кристаллы в виду преимуществ: высокой скорости, практически нулевой ширине реза и отсутствию загрязнений. Однако этот метод, основанный на термическом ударе, индуцированном лазерным излучением внутри материала, хорошо применим в случае бескорпусных, чистых пла-

стин, лишенных каких-либо покрытий. Однако на практике процесс ограничен металл/диэлектрическими пленками и другими покрытиями на пластине, которые затрудняют фокусировку излучения вглубь материала. По данным из различных источников, скорость «невидимой резки» может достигать 150 мм/с.

Метод лазерного управляемого термораскалывания

Метод лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) был разработан профессором В. С. Кондратенко в 80-е годы (Патент РФ по А.с. СССР № 776002, МКИ С 03 В 33/02, приор. 19.02.79), однако он применялся только в единичном производстве изделий для оптоэлектроники. Однако в последнее десятилетие метод лазерного управляемого термораскалывания широкого класса хрупких неметаллических материалов получил бурное развитие и применение в различных областях науки и технологий. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации об успешном применении метода ЛУТ, а также патенты [1–4], имеющие отношение к развитию данного метода и созданию целого класса технологического оборудования.

В основе процесса ЛУТ лежит нагрев, осуществляемый лазерным пучком вдоль линии реза на приборной пластине с последующим охлаждением нагретого участка хладагентом. Заметим, что облучение поверхности материала лазерным излучением приводит к возникновению во внешних его слоях значительных напряжений сжатия, которые, однако, к разрушению непосредственно не приводят. Но именно благодаря хладагенту происходит резкое локальное охлаждение, и образуемый градиент температур приводит к появлению напряжений растяжения в приповерхностном слое, которые создают условия для продвижения трещины. Этот процесс проиллюстрирован на рис. 5.

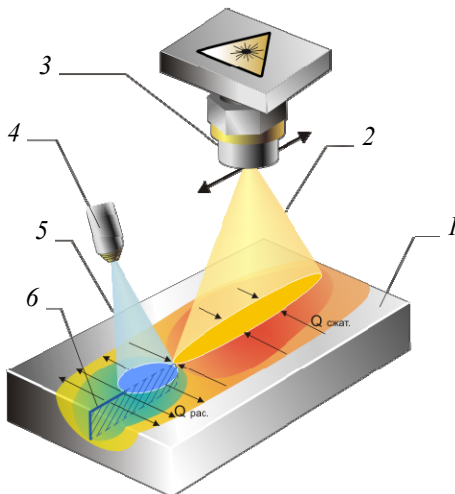


Рис. 5. Схема образования микротрещины методом ЛУТ: 1 – обрабатываемая пластина; 2 – лазерный пучок; 3 – фокусирующий объектив; 4 – форсунка; 5 – хладагент; 6 – микротрещина.

Нагрев и охлаждение подбираются так, что трещина образуется либо на какую-то заданную

глубину, либо насквозь. При этом скорость резания увеличивается на порядки по сравнению с традиционными методами — особенно для тонких заготовок, где возможна скорость свыше 1000 мм/с. Благодаря такой производительности впервые в мире удалось внедрить в производство лазерную резку флотат-стекла [14, 15], т. е. расплавленного стекла, растекающегося по расплавленному же олову. Кстати, так изготавливают до 80 % листового стекла в мире. Режут его обычно механически, при этом образуются микротрещины и другие дефекты, из-за которых прочность уменьшается на 50–60 %.

Метод ЛУТ не только необычно производителен, но и абсолютно бездефектен – ни трещин, ни сколов, прочность впятеро выше, в отличие от обычных методов [16, 17]. По технологии ЛУТ можно резать и толстые, и тонкие материалы (скажем, то же стекло толщиной до 20 мм или тонкие пластины сапфира [18–20] всего в 50 мкм) – качество всегда высочайшее. Кромки получаются идеально ровными и гладкими, что бы ни резали: ниобат и тантал лития или карбид кремния, арсенид галлия или ситалл, керамику или стекло, кварц или даже алмаз, по прямой или любой заданной кривой [21]. Никакие припуски на обработку оставляемых режущим инструментом дефектов не нужны, поскольку дефекты исключены.

Метод ЛУТ реализован на установках лазерного управляемого термораскалывания РТ-350 и РТ-500 [22–24] (производства ОАО Московский завод «Сапфир») для разделения приборных пластин на кристаллы.

При резке хрупких материалов методом ЛУТ обеспечивается повышение прочности кромки в 5–5,5 раз по сравнению с механическим или лазерным скрайбированием. Этот метод не оказывает негативного влияния на технико-эксплуатационные параметры интегральных схем [25–27], что, безусловно, имеет огромное преимущество перед традиционными способами резки. Но в тоже время это создает определенные трудности при резке указанным методом по пересекающимся линиям. Высокопрочная бездефектная кромка пластины после ЛУТ препятствует продвижению трещины при пересечении первоначальных линий реза. Именно поэтому были разработаны и запатентованы варианты, позволяющие преодолеть данное ограничение [3, 4].

Профессор Кондратенко В.С. является научным консультантом компании Foxconn Technology Group (Тайвань) – мирового лидера в области производства электроники и флагманских гаджетов компании Apple. Основным направлением совместной работы стала разработка технологического оборудования для резки изделий из стекла и

сапфира методом ЛУТ. В компании Foxconn Technology Group запущен производственный цех, насчитывающий порядка 300 единиц оборудования для реализации ЛУТ (см. рис. 6).



Рис. 6. Производственное оборудование ЛУТ компании Foxconn Technology Group.

Разработан процесс резки и снятия фаски в одном технологическом цикле для экранов мобильных устройств Apple (рис. 7).



Рис. 7. Примеры экранов изделий продукции Apple, вырезанных методом ЛУТ: а – iPhone; б – iPad; в – Apple Watch.

Разработан также способ притупления кромок изделий из хрупких неметаллических материалов с помощью ЛУТ [28–30] (рис. 8).

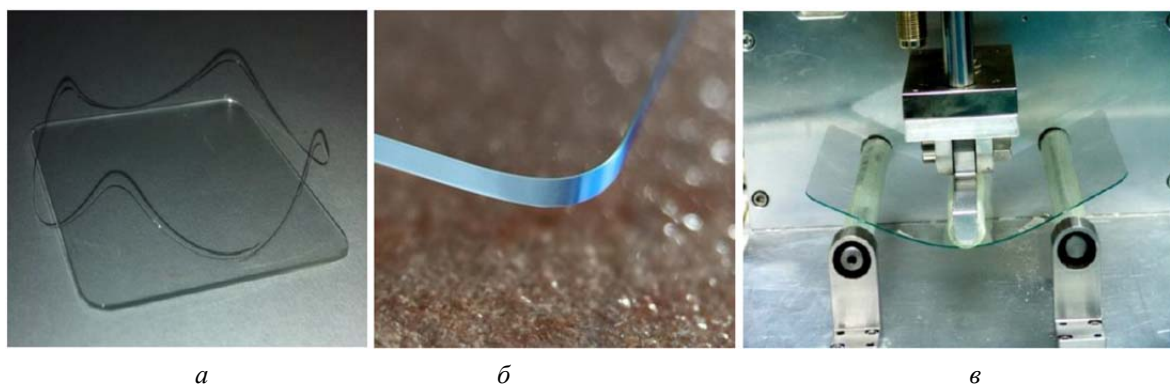


Рис. 8. Экран iPad: а – с снятой фаской; б – кромка при увеличении $\times 60$; в – испытание на поперечный изгиб.

В России накопленный опыт применения технологии ЛУТ (на основании лицензионного договора с патентообладателем) был внедрен компанией ООО «НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» (г. Зеленоград). В 2014 году выпущена опытно-производственная установка МЛП1-1060/355 (рис. 9) для ЛУТ подложек из сапфира и других хрупких неметаллических материалов [31].

На рис. 10 продемонстрировано качество кромок реза приборных пластин после ЛУТ.



Рис. 9. Российская установка МЛП1-1060/355.

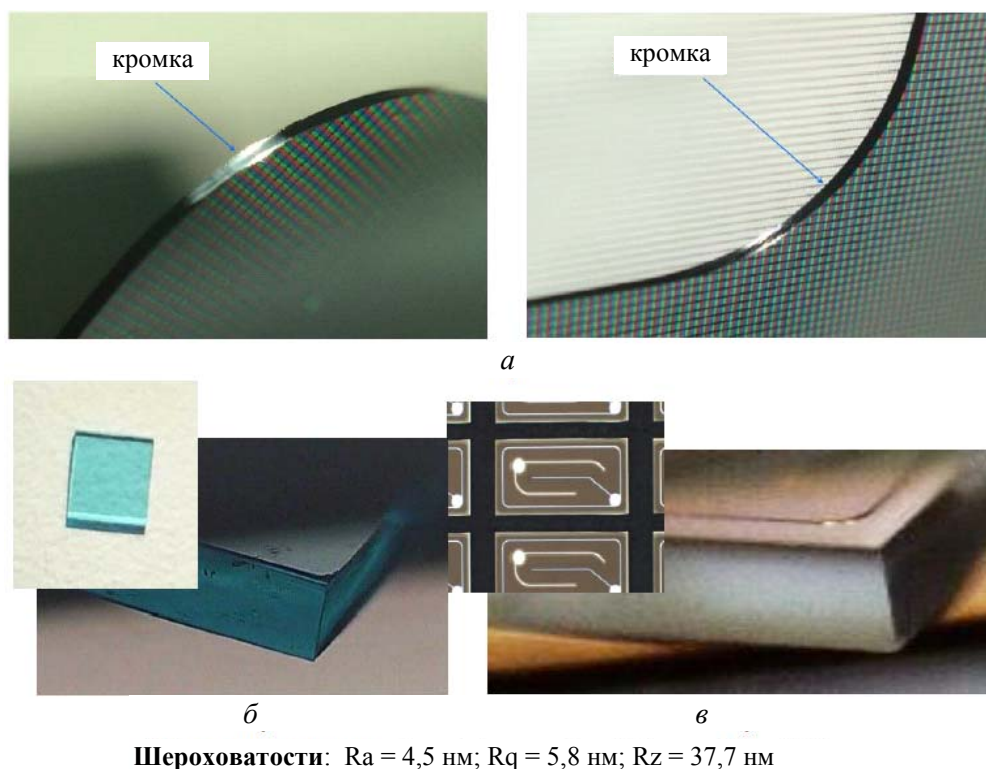


Рис. 10. Кромки реза приборных пластин (а); кромка элемента памяти (ССD) (б); кромка чипа LED (в).

Для сравнения на рис. 11 представлены фотографии торцов кристаллов сапфира, полученных после резки пластин методом ЛУТ, из которых видны явные преимущества ЛУТ перед известными

ми конкурирующими технологиями. Более того, скорость резки пластин из сапфира достигает 750 мм/с и более, что значительно выше в сравнении с методами скрайбирования.

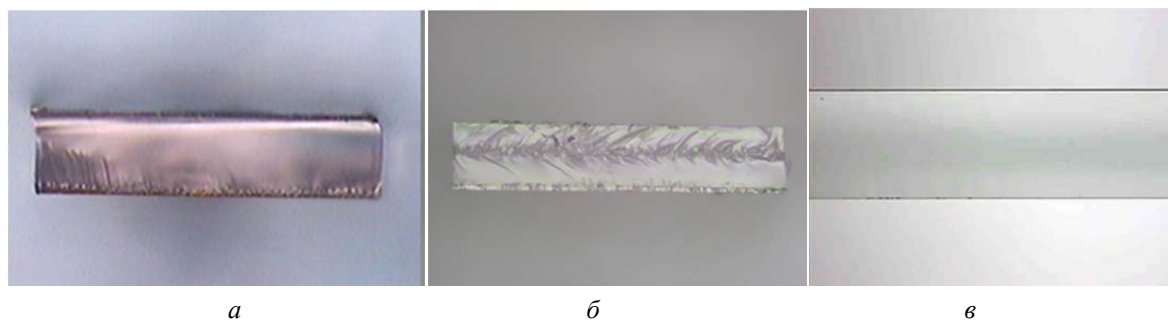


Рис. 11. Торцы кристаллов из сапфира после скрайбирования поверхности пластины УФ-лазером (а), после резки по технологии «невидимой резки» (б) и после резки методом ЛУТ (в).

Обратим внимание на применение метода ЛУТ для решения задач, связанных с проблемами качества резки кремниевых приборных пластин на кристаллы с органическими светоизлучающими диодами (OLED – Organic light emitting diode), в частности, для производства микродисплеев [8, 32–34]. Приборная кремниевая пластина с OLED загерметизированная стеклянной крышкой, поступающая на операцию резки, уже обладает большой себестоимостью.

Передовые производители микродисплеев на OLED, такие как eMagine (США), Sony (Япония),

MicroOLED (Франция), Olightek (Китай) и ООО «ТОПЭ» (Россия), на этапе разделения кремниевых приборных пластин на кристаллы применяют традиционные методы резки, которые даже при оптимальных технологических параметрах не позволяют управлять качеством кристаллов с OLED. В связи с этим был разработан новый метод лазерной резки при помощи ЛУТ, позволяющий обрабатывать кремниевые пластины в сборе с защитным стеклом по обратной стороне. Это делается за счет ИК-камеры с диапазоном чувствительности в спектре 1460–1625 нм (пропускание кремния

~55 %), при помощи которой распознаются реперные метки для резки на рабочей стороне кремниевой пластины. Благодаря этому структуры OLED не деградируют из-за перегрева [35].

Проведено сравнение качества торцов кристаллов после дисковой алмазной резки и после

ЛУТ, где была измерена шероховатость поверхности рабочих кромок кристаллов (рис. 12) с помощью профилометра модели XP-200 фирмы Ambios (США). Шероховатость по рабочим кромкам кристаллов после дисковой резки составляет $R_a = 23,4079$ мкм, а после ЛУТ не более $R_a \sim 0,005$ мкм.

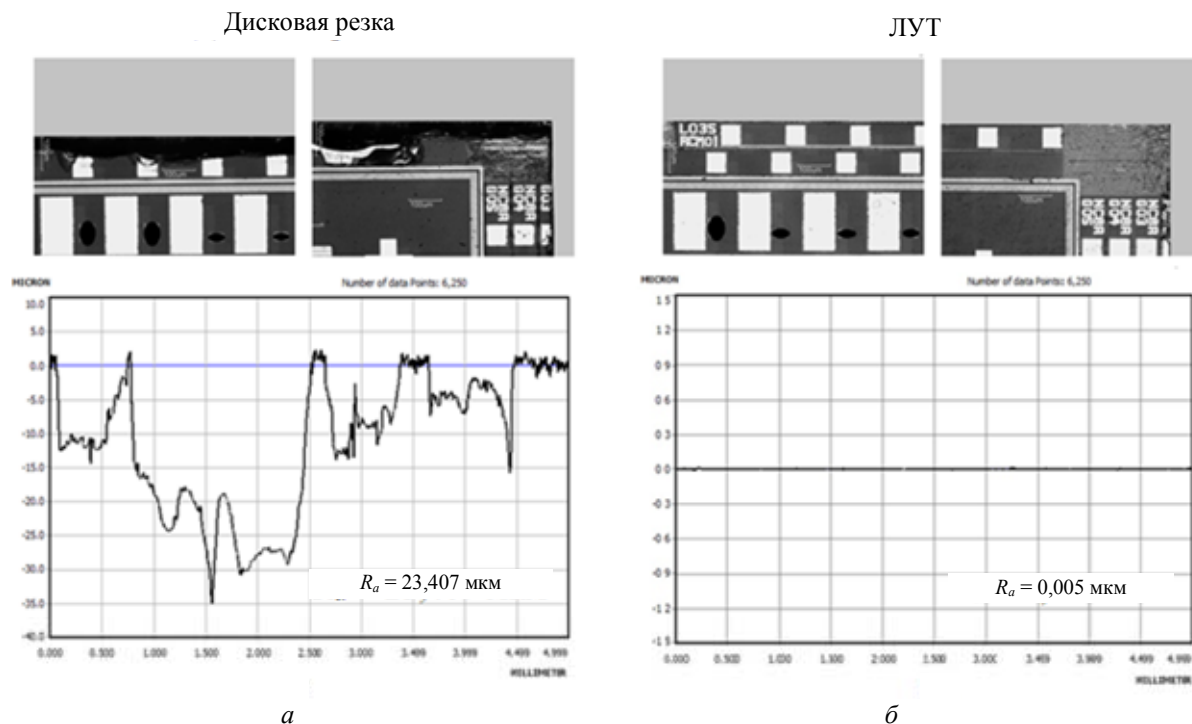


Рис. 12. Фотографии кромок кристаллов и профилограммы поверхностей их кромок после дисковой резки (а) и после ЛУТ (б).

Заключение

Проведенные обзор и анализ, показывают, что внедрение метода ЛУТ в ряд производственных процессов для изготовления защитных экранов, дисплейных панелей и современных электронных изделий на базе полупроводниковых пластин позволяет резко повысить производительность и увеличить выход годной продукции. Все это достигается благодаря основным преимуществам метода ЛУТ перед конкурирующими технологиями, а именно:

- отсутствие дефектов вдоль линий реза, о чем свидетельствуют значения шероховатостей, зачастую на несколько порядков меньших значений конкурентов;
- в сравнении с традиционными технологиями механическая прочность изделий после ЛУТ до 5 раз выше за счет бездефектности кромки;
- высокая скорость процесса, в несколько раз превышающая реальные возможности других методов;
- отсутствие ухудшений или изменений различных элементов и структур на рабочей поверхности пластин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратенко В. С. Патент РФ № 2024441. Способ резки неметаллических материалов. 1992-04-02.
2. Kondratenko V. S. Patent No. WO93/20015. Splitting of non-metallic materials. 1993-10-14.
3. Кондратенко В. С. Способ резки хрупких неметаллических материалов (варианты). Патент на изобретение RUS 2206528 15.08.2001.
4. Кондратенко В. С., Наумов А. С. Патент РФ № 2404931. Способ резки пластин из хрупких материалов. 28.08.2009-08-28.
5. Кондратенко В. С. // РИТМ. 2016. № 1. С. 50.
6. Никифорова-Денисова С. Н. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 книгах. Книга 4. Механическая и химическая обработка. – М.: Высшая школа, 1989.
7. Курносоев А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1986.
8. Иванов В. И. // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 4 (23).
9. Zeng X. J., Mao X., Greif R., Russo R. E. // Proc. SPIE 5448, High-Power Laser Ablation V, 1150 (September 20, 2004); DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.544401>
10. Bovatsek J. M., Patel R. S. // Proc. SPIE 7585, Laser-based Micro- and Nanopackaging and Assembly IV, 75850K (February 23, 2010); DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.845298>
11. Bonse J., Baudach S., Kruger J., Kautek W., Lenzner M. // Applied Physics A.74. 2002. P. 19.

12. Raciukaitis G., Brikas M. // Proc. SPIE 5662, Fifth International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 717 (October 8, 2004); DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.596604>
13. Klotzbach U., Panzner M., Kasper J., Hendrik W., Thomas K., Franke V., Eckhard B. // Proc. SPIE 4637, Photon Processing in Microelectronics and Photonics, 496 (June 17, 2002); DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.470659>
14. Кондратенко В. С., Борисовский В. Е., Гиндин П. Д. // Вестник МГУПИ. 2006. № 7. С. 73.
15. Кондратенко В. С., Жималов А. Б., Солинов В. Ф., Каплина Т. В. // Стекло и керамика. 2006. № 10. С. 3.
16. Кондратенко В. С., Солинов В. Ф., Танасейчук А. С., Шершнев Е. Б. // Электронная промышленность. 1988. № 1(69). С. 30.
17. Кондратенко В. С., Кобыш Н. И., Наумов А. С., Гиндин П. Д., Трубиенко О. В., Илюхин С. А. Влияние способов обработки кромки стекла на прочность изделия / Труды МНТК «Инновационные технологии в науке, технике и образовании» (Тунис, 12–19 октября 2008 г.). – М.: МГУПИ. 2009. С. 60–65.
18. Кондратенко В. С., Машевич П. Р., Минаев В. В. Лазерное управляемое термораскалывание пластин сапфира. Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем». 2009. Вып. 12/ «Стойкость 2009». С. 228.
19. Кондратенко В. С., Наумов А. С. // Приборы. 2011. № 10 (136). С. 37.
20. Kondratenko V. S., Borisovsky V. E., Naumov A. S. New Laser Cutting Technology of Sapphire Wafers on Crystals / Advanced Materials Research Vol. 660 (2013). Online available since 2013/Feb/13 at www.scientific.net. © (2013) Trans Tech Publications. Switzerland. P. 30–34.
21. Kondratenko V. S., Borisovsky V. Ye., Naumov A. S. // Optics and Photonics Journal (OPJ). 2015. Vol. 5. No. 10. P. 295.
22. Кондратенко В. С., Борисовский В. Е., Гиндин П. Д., Колесник В. Д., Наумов А. С., Сорокин А. В., Черных С. П. // Приборы. 2006. № 4(70). С. 38.
23. Кондратенко В. С., Гиндин П. Д., Колесник В. Д., Сорокин А. В. Установка для лазерной резки полупроводниковых пластин РТ-350 / Труды МНТК «Инновационные технологии в науке, технике и образовании» (Египет, 14–21 ноября 2009 г.). – М.: МГУПИ, 2009. С. 9.
24. Кондратенко В. С., Гиндин П. Д., Наумов А. С., Колесник В. Д., Сорокин А. В. Установка для лазерной резки стекла РТ-500 / Труды МНТК «Инновационные технологии в науке, технике и образовании» (Египет, 14–21 ноября 2009 г.). – М.: МГУПИ, 2009. С. 10.
25. Щаврук Н. В., Мальцев П. П., Трофимов А. А., Кондратенко В. С., Зобов А. К. / Сборник трудов 6-й Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» 2015, г. Москва – НИЯУ МИФИ. 2015. С. 54–55.
26. Гамкрелидзе С. А., Кондратенко В. С., Стыран В. В., Трофимов А. А., Щаврук Н. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 80.
27. Гамкрелидзе С. А., Кондратенко В. С., Стыран В. В., Трофимов А. А., Щаврук Н. В. // Приборы. 2017. № 1. С. 43.
28. Кондратенко В. С., Борисовский В. Е., Гиндин П. Д., Наумов А. С., Сюй Тунг Минг, Сюй Чи Вай Перри Новая технология лазерного притупления острых кромок изделий из стекла / Труды Международной научно-технической конференции «Стеклопрогресс-XXI». Саратов. 27–30 мая 2008.
29. Кондратенко В. С., Наумов А. С. Способ притупления острых кромок изделий / Патент РФ № 2426700 по заявке № 2009134857 от 18.09.2009. Опубл. 20.08.2011. Бюл. № 23.
30. Kondratenko V. S., Gindin P. D., Trubienko O. V., Hsu Muchi, Naumov A. S. // J. Optical Technology. 2009. Vol. 76. Issue 11. P. 733.
31. Кондратенко В. С., Зобов А. К., Наумов А. С., Лу Хунг-Ту // Фотоника. 2015. № 2 (50). С. 42.
32. Кондратенко В. С., Борисовский В. Е., Иванов В. И. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2014. № 2. С. 76.
33. Кондратенко В. С., Борисовский В. Е., Иванов В. И., Зобов А. К. // Приборы. 2015. № 9 (183). С. 49.
34. Кондратенко В. С., Иванов В. И. // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 36.
35. Кондратенко В. С., Иванов В. И. / Российская научно-техническая конференция с международным участием. Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех-2017). – М.: МИРЭА, 2017.

PACS: 07.50.-e

Modern methods and equipment for cutting semiconductor wafers on crystals (a review)

V. I. Ivanov^{1,2} and V. S. Kondratenko¹

¹Moscow Technological University (MIREA)
20 Stromynka str., Moscow, 107996, Russia
E-mail: vsk1950@mail.ru

²Organic and printed electronics technologies, Ltd.
77 Shchelkovskoe shosse, Moscow, 107497, Russia
E-mail: ivi061@gmail.com

Received March 15, 2018

In this paper, we consider highly effective methods for cutting wafers on crystals, which allow processing complex and expensive devices. Authors substantiate and prove experimentally the effectiveness of using laser controlled thermocracking (LCT) method, the advantages and results of success-

ful implementation of LCT method for precision cutting of glass, silicon, sapphire and other brittle nonmetallic materials are presented.

Keywords: microelectronics, processing of semiconductor materials, cutting wafers on crystals, laser controlled thermocracking, LCT method.

REFERENCES

1. V. S. Kondratenko, Patent RF No. 2024441. 1992-04-02.
2. V. S. Kondratenko, Patent No. WO93/20015. 1993-10-14.
3. V. S. Kondratenko, Patent RUS 2206528. 15.08.2001
4. V. S. Kondratenko and A. S. Naumov, Patent RF No. 2404931. 28.08.2009-08-28.
5. V. S. Kondratenko, RITM, No. 1, 50 (2016).
6. S. N. Nikiforova-Denisova, *Technology of Semiconductor Devices* (Vysshaya shkola, Moscow, 1989) [in Russian].
7. A. I. Kurnosov and V. V. Yudin, *Technology of Making the Semiconductors* (Vysshaya shkola, Moscow, 1986) [in Russian].
8. V. I. Ivanov, Internet-Journal Naukovedenie, No. 4, (2014).
9. X. J. Zeng, X. Mao, R. Greif, and R. E. Russo, Proc. SPIE **5448**, 1150 (2004); DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.544401>
10. M. James Bovatsek and S. Patel Rajesh, Proc. SPIE **7585**, Laser-based Micro- and Nanopackaging and Assembly IV, 75850K (2010); DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.845298>
11. J. Bonse, S. Baudach, J. Kruger, et al., Applied Physics **A.74**, 19 (2002).
12. G. Raciukaitis and M. Brikas, Proc. SPIE **5662**, Fifth International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 717 (October 8, 2004); DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.596604>
13. U. Klotzbach, M. Panzner, J. Kasper, et al., Proc. SPIE **4637**, Photon Processing in Microelectronics and Photonics, 496 (June 17, 2002); DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.470659>
14. V. S. Kondratenko, V. E. Borisovskij, and P. D. Gindin, Vestnik MGUPI, No. 7, 73 (2006).
15. V. S. Kondratenko, A. B. Zhimalov, V. F. Solinov, and T. V. Kaplina, Steklo i keramika, No. 10, 3 (2006).
16. V. S. Kondratenko, V. F. Solinov, A. S. Tanasejchuk, et al., Elektronnaya Promyshlennost'. No. 1 (69), 30 (1988).
17. V. S. Kondratenko, N. I. Kobyshev, A. S. Naumov, et al., in Proc. MNTK "Innov. Technol. in Science" (Tunis, 12–19 October 2008). M.: MGUPI. 2009. P. 60–65.
18. V. S. Kondratenko, P. R. Mashevich, and V. V. Minaev, in Book: *Radiac. Resist. Electr. Systems*. No. 12. (Moscow. 2009). P. 228.
19. V. S. Kondratenko and A. S. Naumov, Pribory, No. 10(136), 37 (2011).
20. V. S. Kondratenko, V. E. Borisovsky, and A. S. Naumov, Advanced Materials Research Vol. 660 (2013). Online available since 2013/Feb/13 at www.scientific.net. © (2013) Trans Tech Publications. Switzerland. P. 30–34.
21. V. S. Kondratenko, V. E. Borisovsky, and A. S. Naumov, Optics and Photonics Journal (OPJ). **5** (10), 295 (2015).
22. V. S. Kondratenko, V. E. Borisovsky, P. D. Gindin, et al., Pribory, No. 4 (70), 38 (2006).
23. V. S. Kondratenko, P. D. Gindin, V. D. Kolesnik, A. V. Sorokin, in Proc. Intern. Conf. "Innov. Technol. in Science" (Egypt, 14–21 November 2009). M.: MGUPI. 2009. P. 9.
24. V. S. Kondratenko, P. D. Gindin, A. S. Naumov, et al., in Proc. Intern. Conf. "Innov. Technol. in Science" (Egypt, 14–21 November 2009). M.: MGUPI. 2009. P. 10.
25. N. V. Shavruk, P. P. Mal'cev, A. A. Trofimov, et al., in Proc. 6-th Intern. Conf. on Physics «Mokerovskie Chtenija» 2015, Moscow – MIFI. 2015. P. 54–55.
26. S. A. Gamkrelidze, V. S. Kondratenko, V. V. Styran, et al., Usp. Prikl. Fiz. **5** (1), 80 (2017).
27. S. A. Gamkrelidze, V. S. Kondratenko, V. V. Styran, et al., Pribory, No. 1, 43 (2017).
28. V. S. Kondratenko, V. E. Borisovsky, P. D. Gindin, et al., in Proc. Intern. Conf. «Stekloprogress-XXI». Saratov. 27–30 May, 2008.
29. V. S. Kondratenko and A. S. Naumov, RF Patent No. 2426700. 20.08.2011.
30. V. S. Kondratenko, P. D. Gindin, O. V. Trubienko, et al., Journal of Optical Technology **76**, 733 (2009).
31. V. S. Kondratenko, A. K. Zobov, A. S. Naumov, et al., Fotonika, No. 2 (50), 42 (2015).
32. V. S. Kondratenko, V. E. Borisovsky, and V. I. Ivanov, Oboronnyi Kompleks – Nauchno-Tekhnicheskomu Progressu Rossii, No. 2, 76 (2014).
33. V. S. Kondratenko, V. E. Borisovsky, V. I. Ivanov, and A. K. Zobov, Pribory. No. 9 (183), 49 (2015).
34. V. S. Kondratenko and V. I. Ivanov, Prikl. Fiz., No. 1, 36 (2017).
35. V. S. Kondratenko and V. I. Ivanov, in Proc. Russian Conf. on Optical Technologies and Materials. (Moscow, MIREA, 2017). P. 52–58.