МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.373.8

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ В РОССИИ

В.С. Кондратенко¹, д.т.н., профессор, директор; А.С. Наумов², к.т.н., помощник вице-президента, отдел лазерной резки; А.Ю. Рогов¹, заместитель директора

¹Физико-технологический институт, Московский технологический университет, Москва, 119454 Россия ²Компания Наноплюс Лтд, Тайвань

Работа посвящена развитию высокоэффективных технологий прецизионного раскроя хрупких неметаллических материалов на основе метода лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ), который получает в последнее время все большее распространение и признание во всем мире. Приведены некоторые примеры решения высокотехнологичных задач с использованием метода ЛУТ на российской промышленной установке МЛП1-1060/355 для прецизионной резки подложек из сапфира и других хрупких неметаллических материалов. В работе проведен анализ преимуществ метода ЛУТ по сравнению с распространенным в настоящее время способом резки - скрайбированием пикосекундным лазером. Наглядно продемонстрированы практические результаты таких работ как: резка сапфировых приборных пластин на кристаллы; разделение сапфировых подложек на элементы, критичные к внешним воздействиям; резка кремниевых приборных пластин с ОСИД структурами; резка узких сапфировых подложек для светодиодных ламп нового поколения; резка трубок круглого сечения и дисков различного диаметра; резка трубок квадратного сечения и квадратных элементов из боросиликатного стекла; разработка технологии создания сеток на поверхности оптических элементов. Приведенные в работе результаты исследований свидетельствуют об успешном использовании российской технологии ЛУТ для решения высокотехнологичных задач резки пластин из хрупких неметаллических материалов, таких как сапфир, стекло и кремний на промышленной установке отечественного производства.

Ключевые слова: лазерное управляемое термораскалывание, сапфир, стекло, кремний.

INTRODUCTION OF LASER TECHNOLOGY CONTROLLED THERMO-CRACKING IN RUSSIA

V.S. Kondratenko¹; A.S. Naumov²; A.Yu. Rogov¹

⁻Компания Пиноплюс Лто, Таивинь

[@]Автор для переписки, e-mail: vsk1950@mail.ru

The work is dedicated to the development of highly efficient technologies of precision cutting brittle non-metallic materials on the basis of a method of laser-managed thermosplitting (LCT), which gets recently the increasing distribution and worldwide recognition. Some examples of high-tech solutions to problems using the method of LCT on the Russian industrial plant MLP1-1060 / 355 for precise cutting of sapphire substrates and other brittle non-metallic materials. The paper analyzes the advantages of LCT method in comparison with common now cutting way - scribing laser picosecond. Visually-selling onstrate the practical results of such work as cutting instrument sapphire crystals on the plates; Sec-tion of sapphire substrates on elements critical to external influences; cutting instrument silicon wafers with OLED structures; narrow cutting sapphire substrates for LED lamps of the new generation; cutting circular tubes of different diameters and disc; cutting of tubes of square section and the square of elements of borosilicate glass; Development of technologies for creating grids on the surface of the optical elements. Cited in the results of the studies indicate that the successful use of the Russian LCT technology to solve problems of high-tech cutting plates of brittle non-metallic materials such as sapphire, glass, and silicon on the plant produced domestically.

Keywords: laser controlled thermocracking; sapphire, glass, silicon.

анная работа посвящена анализу практики применения технологии лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ), разработанной и запатентованной в России и за рубежом [1, 2].

На примерах решения высокотехнологичных задач по лазерной резке на установке МЛП1-1060/355, принадлежащей Физико-технологическому институту Московского технологического университета, продемонстрирован потенциал технологии ЛУТ по резке хрупких неметаллических материалов.

Физическая модель метода ЛУТ приведена на рис. 1.

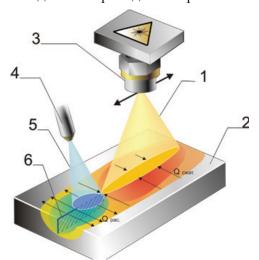


Рис. 1. Схема образования микротрещины в процесс ЛУТ:
1 – лазерный пучок; 2 – обрабатываемая пластина;
3 – фокусирующий объектив; 4 – форсунка;
5 – хладоагент; 6 – микротрещина.

¹Moscow Technological university, Physico-Technological Institute, Moscow, 119454 Russia ²Nanoplus Ltd. (Taiwan (R.O.C.)

[@]Corresponding author e-mail: vsk1950@mail.ru

При облучении лазерным пучком 1 поверхности хрупкого материала 2, который является непрозрачным для длины волны лазерного излучения, фокусируемого объективом 3, в зоне нагрева в поверхностных слоях возникают значительные напряжения сжатия, которые, однако, к разрушению материала не приводят. При подаче вслед за лазерным пучком с помощью форсунки 4 хладоагента 5 происходит резкое локальное охлаждение поверхности материала по линии реза. Возникающий при этом градиент температур обусловливает возникновение в поверхностных слоях материала напряжений растяжения, обеспечивающих при определенных условиях превышение предела прочности материала и образование микротрещины 6.

Основными преимуществами метода ЛУТ являются:

- безотходность процесса разделения материала;
- высокая чистота процесса, не загрязняющего поверхность материала при резке;
- нулевая ширина реза;
- высокая скорость резки, достигающая до 1 метра в секунду;
- высокая точность раскроя материалов;
- повышение прочности изделий до 5 раз, по сравнению с механической резкой.

На рис. 2 показаны сравнительные результаты резки одинаковых образцов стекла толщиной 0.4 мм по линиям реза свободной формы методом ЛУТ (рис. 2а) и скрайбированием с помощью пикосекундного лазера (рис. 2б), приведенные компанией-лицензиатом «Foxconn Technology Group» (Тайвань). Метод ЛУТ продемонстрировал пятикратное преимущество по скорости резки (350 мм/с против 70 мм/с скрайбированием) и значительное повышение качества кромки стекла, а именно: уменьшение шероховатости поверхности в 240 раз (с Ra = 1.2 мкм при скрайбировании до Ra = 0.005 мкм при резке методом ЛУТ). Следует также отметить, что ширина реза методом ЛУТ равна нулю, в то время как при скрайбировании пикосекундным лазером ширина реза составляет 120 мкм [3].

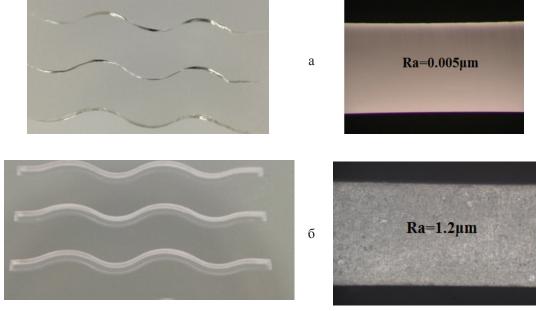


Рис. 2. Сравнение результатов различной лазерной резки стекла толщиной 4 мм (по данным «Foxconn Technology Group», Тайвань):

- а) метод ЛУТ: ширина реза 0, шероховатость поверхности кромки Ra = 0.005 мкм;
- б) скрайбирование: ширина реза 0.15 мм, шероховатость поверхности Ra = 1.2 мкм.

Еще одним преимуществом ЛУТ является увеличение прочностных параметров готовых изделий по сравнению с другими видами резки. Испытания на поперечный изгиб изделий из стекла и сапфира, вырезанных методом ЛУТ, демонстрируют пятикратное увеличение механической прочности кромки по сравнению с механической резкой (рис. 3). Данный эффект обеспечивается отсутствием микродефектов вдоль линии реза, а также дополнительным термическим упрочнением кромки в процессе ЛУТ.

б



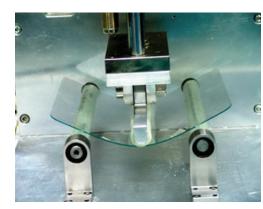
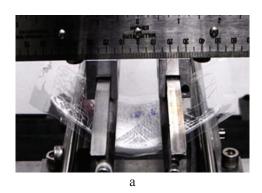


Рис. 3. Высокая механическая прочность изделия, вырезанного методом ЛУТ: а) вид кромки реза защитного экрана из стекла после ЛУТ; б) испытание защитного экрана на поперечный изгиб.

На рис. 4 показаны результаты прочностных испытаний сапфирового экрана толщиной 0.5 мм при испытаниях на поперечный изгиб. Разрушение экрана происходит по кристаллической решетке сапфира, а это свидетельствует о том, что прочность кромки не ниже прочности поверхности материала. Результаты испытаний показали, что разрушение сапфировых экранов, вырезанных методом ЛУТ, наступали при нагрузке в диапазоне 1700–2300 МПа, в то время как резка пикосекундными лазерами или механическая обработка путем шлифования и полирования кромки не давали результатов выше 400 МПа.



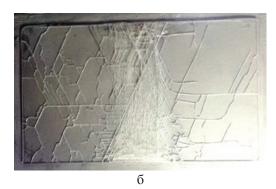


Рис. 4. Прочностные испытаний сапфирового экрана толщиной 0.5 мм после резки ЛУТ: а) схема испытаний; б) характер разрушений.

Первая российская промышленная установка МЛП1-1060/355 для прецизионной резки подложек из сапфира и других хрупких неметаллических материалов была изготовлена компанией ООО «Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ» (г. Зеленоград) на основании лицензионного договора с патентообладателем Кондратенко В.С. (рис. 5).



Рис. 5. Фотография российской установки для резки приборных пластин на кристаллы МЛП1-1060/355.

Примеры решения высокотехнологичных задач на установке ЛУТ МЛП1-1060/355

1. Резка сапфировых приборных пластин на кристаллы

Твердотельные приборы современных электронных устройств — транзисторы, диоды, светодиоды, фотоприемники, лазеры, датчики, фильтры, сенсоры и другие изделия изготавливаются по групповой технологии, которая предусматривает формирование на одной подложке из различных материалов, в частности, сапфира, функциональных структур, которые в дальнейшем разделяются на отдельные кристаллы. После корпусирования разделенных кристаллов получают готовые приборы. Традиционными методами разделения пластин на кристаллы являются механическое и лазерное скрайбирование. Недостатками обоих методов является низкое качество линии разделения и необходимость последующего механического разламывания.

Первые попытки использования метода ЛУТ для резки приборных сапфировых пластин на кристаллы в производстве светоизлучающих диодов показали его перспективность и бесспорные преимущества [4]. Главным преимуществом технологии ЛУТ - в данном применении - является высокая производительность (скорость резки 350–700 мм/с), возможность сквозной резки без операции разламывания и бездефектность кромки, позволяющей достигать яркости светодиодов большей, нежели после обработки другими методами [5].

Примеры резки сапфировых приборных пластин со структурами светоизлучающих диодов (СИД) на кристаллы показан на рис. 6.

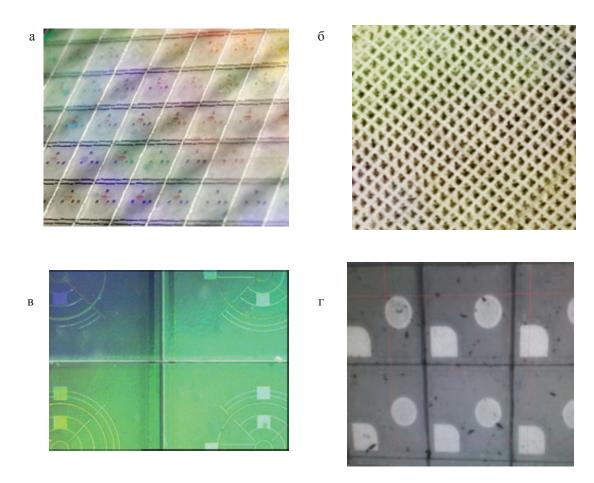


Рис. 6. Фрагменты разрезанных с помощью ЛУТ сапфировых приборных пластин со структурами СИД (a, б), увеличенное изображение кристаллов размером 2.63×3.03 мм (в) и 0.36×0.36 мм (г).

2. Разделение сапфировых подложек на элементы, критичные к внешним воздействиям

Сформированные на подложке рабочие элементы в отдельных случаях имеют сложную внутреннюю структуру или специальные покрытия, критичные к внешним воздействиям, таким как механическое давление, вибрация, перегрев, загрязнение продуктами резки и др. В таких случаях резка традиционными способами с использованием алмазных дисков или методом лазерного скрайбирования приводит к резкому снижению процента выхода годных изделий и не всегда удовлетворяет специальным техническим требованиям.

Так, при наличии на поверхности разделяемых элементов специального покрытия, например, дополнительная операция механического разламывания после резки алмазным диском у тонкопленочных фильтров приводит к повреждению покрытия, появлению выколок и других дефектов вдоль линии разлома.

На установке МЛП1-1060/355 с помощью технологии ЛУТ при выполнении ряда работ по разделению сапфировых пластин на рабочие элементы со сложной поверхностной структурой (рис. 7) был обеспечен выход годных изделий в объеме 95–99%: оптических фильтров (рис. 7а) и элементов СВЧ-электроники (рис. 7б).





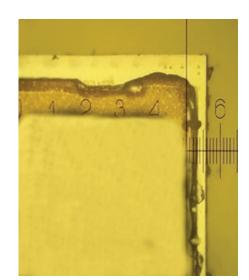


Рис. 7. Примеры изделий на сапфировой подложке со сложными поверхностными структурами: а) оптический фильтр; б) бездефектная кромка элемента СВЧ-электроники.

б

3. Резка кремниевых приборных пластин с ОСИД-структурами

Кремний является самым распространенным полупроводниковым конструкционным материалом, на основе которого могут быть сформированы электронные, механические, тепловые, органические и оптические элементы и структуры, в том числе кристаллы с органическими светоизлучающими диодами (ОСИД, или OLED) для производства OLED-микродисплеев [6].

На сегодняшний день для резки кремниевых пластин на кристаллы с OLED применяются методы скрайбирования алмазным инструментом, скрайбирование лазером, лазерное внутриобъемное скрайбирование "stealth dicing", надрезание и сквозная резка диском с алмазной режущей кромкой. Однако все эти способы сопровождаются механическими или тепловыми воздействиями на разделяемые кристаллы и могут вызвать повреждения тонких пленок, органических структур и чувствительной электроники на кристалле [7].

Проведенные исследования и полученные результаты показали высокую эффективность применения метода ЛУТ по предварительно нанесенным импульсным УФ-лазером надрезам для разделения кремниевых пластин Ø 200 мм и толщиной 725 мкм со структурами микродисплеев на основе ОСИД (рис. 8).

Резка кремниевой пластины 1 с кристаллами 2 осуществляется следующим образом. При резке пластины в первом (I) и втором (II) направлениях для получения сквозных разделяющих трещин 3 с ее обратной стороны предварительно наносятся надрезы 4 по всей длине резов с помощью сфокусированного пучка импульсного лазера 5. При последующем нагреве линии надреза 4 лазерным пучком 6 и последующем охлаждении зоны нагрева с помощью хладоагента 7 происходит образование сквозной разделяющей трещины 3.

Благодаря надрезам глубиной 100 мкм и последующему сквозному ЛУТ, резы формировались ровными, без отклонений, и торцы рабочей поверхности кристаллов получились качественными по двум направлениям (рис. 9).

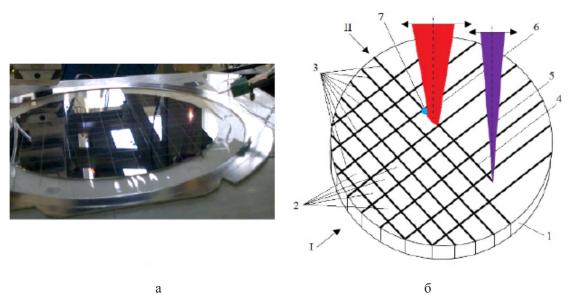


Рис. 8. Процесс нанесения надреза с помощью импульсного лазера (a) и схема ЛУТ пластины на кристаллы по надрезам (б).

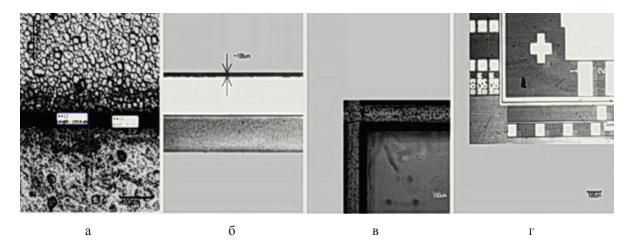


Рис. 9. Видимая ширина зоны термического влияния и ширина надреза, увеличение $40 \times (a)$; глубина надреза 100 мкм в профиль, увеличение $5 \times (6)$; качество резов после ЛУТ по двум направлениям с рабочей стороны, увеличение $20 \times (B, \Gamma)$.

4. Резка узких сапфировых подложек для светодиодных ламп нового поколения

Технология ЛУТ обеспечила возможность получения узких сапфировых пластин шириной, близкой к толщине материала, с бездефектной гладкой кромкой с шероховатостью $Ra\approx0.005$ мкм, соответствующей полированной поверхности. Разработана технология резки сапфировых пластин диаметром 50.8 мм и толщиной 0.6 мм на элементы с размерами $30\times1.0\times0.6$ мм на установке МЛП1-1060/355 (рис. 10a), которая позволила резко повысить выход годных элементов для нового класса высокоэффективных светодиодных ламп (рис. 10a). В таких лампах каждый рабочий элемент (рис. 106) представляет собой

узкую полоску сапфира, на одной стороне которой размещены 5-10 кристаллов светодиодов, а на противоположной — люминофор. В результате получается протяженный свето-излучающий элемент с интегральной светимостью. Получение таких рабочих элементов с помощью традиционных способов резки приводит к недопустимому проценту брака.



Рис. 10. Сапфировая пластина, разделенная на элементы 30×1.0×0.6 мм (а), вид торца сапфирового элемента и элемент с СИД (б), новая светодиодная лампа (в).

5. Резка трубок круглого сечения и дисков различного диаметра

Исследования и эксперименты показали, что методом ЛУТ можно разделять хрупкие материалы не только в виде пластин различной толщины, но и в виде трубок с различным по форме сечением. Показательной является разработанная технология вырезания оптических дисков-окон (рис. 11а) и стеклянных цилиндров (рис. 11б) методом лазерного управляемого термораскалывания с последующей лазерной сваркой оптических дисков и цилиндра [9].

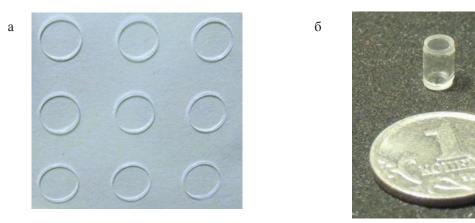


Рис. 11. Диски диаметром 4 мм, вырезанные в стеклянной пластине марки Пирекс, толщиной 0.5 мм (а), кювета для миниатюрных атомных часов (б).

Преимущества технологии:

- исключаются трудоемкие операции шлифования и полирования стеклянных деталей;
- за счет бездефектности кромки диска и его повышенной механической прочности не происходит разрушения диска в процессе сварки;
- благодаря небольшому размеру нагреваемой зоны, лазерная сварка не искажает крышку в зоне светового диаметра;
- возможна приварка второго окна в вакуумной камере после напуска в кювету рабочего газа.

В результате стало возможным создание новой конструкции миниатюрной вакуум-плотной стеклянной кюветы для атомных часов, востребованных, например, системой ГЛОНАСС.

6. Резка трубок квадратного сечения и прямоугольных элементов из боросиликатного стекла

В некоторых применениях требуется использование стеклянных кювет в виде ячейки кубической формы, например, для создания гироскопов на ядерном магнитном резонансе. Для обеспечения высокой степени симметрии заказчиком было предложено вырезать заготовки для ячейки кубической формы: отрезки квадратных трубок (рис. 12а) и квадратные крышки (рис. 12б) из боросиликатного стекла марки Borofloat 33.









Рис. 12. Заготовки для ячейки кубической формы из стекла Borofloat 33: а) отрезки с квадратным сечением 6.5×6.5 мм и длиной 5.2 мм; б) квадратные крышки 6.5×6.5 мм.

Технология резки квадратных трубок стекла оказалась более сложной, чем резка круглых трубок. Потребовалась дополнительная оснастка, обеспечивающая контролируемый поворот граней трубки вокруг своей оси и шаговое ее перемещение в продольном направлении.

За счет бездефектной кромки обеспечивается высокая параллельность линий разделения заготовок из квадратных трубок (рис. 13), что позволяет проводить лазерную приварку квадратных крышек с высоким качеством и повысить выход годных изделий.

7. Технология создания сеток на поверхности оптических элементов

В большинстве оптических приборов, предназначенных для наблюдения и прицеливания, имеются детали с нанесенными системами линий, цифр, индексов, фигур, обеспе-



Рис. 13. Отрезок квадратной трубки из стекла Borofloat 33 после резки ЛУТ.

чивающих измерения и наведение на объект. Такие детали — в зависимости от взаимного расположения нанесенных элементов — называют шкалой или сеткой. Сетки служат, главным образом, для наведения прибора на объект.

Традиционные способы изготовления сеток: механический, травления и фотолитографический, как наиболее точный, обладают существенными недостатками, главными из которых являются сложность и длительность технологических процессов, их насыщенность вредными отходами, которые негативно влияют на здоровье персонала и окружающую среду.

В результате исследований различных способов нанесения сеток на поверхность оптических элементов на установке ЛУТ МЛП1-1060/355, в состав которой входят два лазера — УФ-лазер и CO_2 -лазер, экспериментально установлено, что наиболее универсальным способом создания сеток сложной конфигурации является способ лазерного скрайбирования с помощью УФ-лазера с длиной волны 335 нм. Эксперименты показали, что в зависимости от режимов скрайбирования возможно управление шириной канавки в диапазоне 4–40 мкм и глубиной в диапазоне 12–80 мкм.

В целях повышения производительности и обеспечения повторяемости результатов разработано специальное программное обеспечение для управления излучением УФ-лазера, позволяющее автоматизировать процесс и уменьшить более, чем на порядок, время нанесения сеток по сравнению с традиционным фотолитографическим способом. К примеру, время нанесения сетки сложной конфигурации составляет менее 3 мин (рис. 14), процесс нанесения безотходный и экологически чистый [10].



Рис. 14. Прицельная сетка с криволинейным контуром.

Приведенные в работе результаты исследований свидетельствуют об успешном использовании российской технологии ЛУТ для решения высокотехнологичных задач резки пластин из хрупких неметаллических материалов, таких, как сапфир, стекло и кремний, на промышленной установке МЛП1-1060/355, разработанной и изготовленной в России. Высокопроизводительная технология создания сеток на поверхности оптических элементов демонстрирует расширенный функционал оборудования, позволяющий решать не традиционные для лазерного разделения материалов задачи.

Литература:

- 1. Кондратенко В.С. Способ резки хрупких материалов : патент РФ № 2024441, МКИ5 СОЗ В 33/02. 1991.
 - 2. Kondratenko V.S. Splitting of non-metallic materials: patent № WO9320015. 1993-10-14.
- 3. Кондратенко В.С., Наумов А.С. Развитие и внедрение технологий лазерного управляемого термораскалывания на международном рынке // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. Т. 2. № 3 (8). С. 1–11.
- 4. Kondratenko V., Gindin P., Tchernykh S. Laser controlled thermocracking die separation technique for sapphire substrate based devices // Phys. Stat. Sol. (c) 0. 2003. № 7. P. 2232–2235.
- 5. Кондратенко В.С., Зобов А.К., Наумов А.С., Лу Хунг-Ту. Технология прецизионной лазерной резки сапфировых пластин // Фотоника. 2015. № 2 (50). С. 42–52.
- 6. Грачев О.А., Иванов В.И., Кондрацкий Б.А., Усов Н.Н. и др. Исследование и разработка технологии создания активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов (ОСИД) // Нанотехника. 2014. № 2 (38). С. 43–45.
- 7. Иванов В.И. Методы резки кремниевых приборных пластин на чипы в производстве органических микродисплеев // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 4 (23). [Электронный ресурс] Науковедение, 2014 Режим доступа: http://naukovedenie.ru/PDF/87TVN414.pdf, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
- 8. Кондратенко В.С., Борисовский В.Е., Иванов В.И., Зобов А.К. Повышение эффективности процесса лазерной резки кремниевых приборных пластин на кристаллы ОСИД // Приборы. 2015. № 9 (183). С. 49.
- 9. Кондратенко В.С., Наумов С.А., Сорокин А.В., Величанский В.Л., Севостьянов Д. Технология создания кюветы для сверхминиатюрных атомных часов / Приборы. 2012. № 12. С. 27–30.
- 10. Кондратенко В.С., Исай И.А. Лазерная технология изготовления сеток и шкал для оптических приборов // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 3 (8), т. 2. МИРЭА. С. 22–28.