

функции предварительной обработки, анализа и отображения спектральных данных. Разработка ПО выполнена средствами языка C++ в среде Microsoft Visual Studio 2005. При разработке использовалось SDK контроллера систем регистрации фирмы ORMINS на основе CCD датчиков. Управление дифракционной решеткой полихроматора выполняется вручную, показания микровинта используются в программном обеспечении ЛАЭМС для калибровки спектрального диапазона полихроматора с системой регистрации.

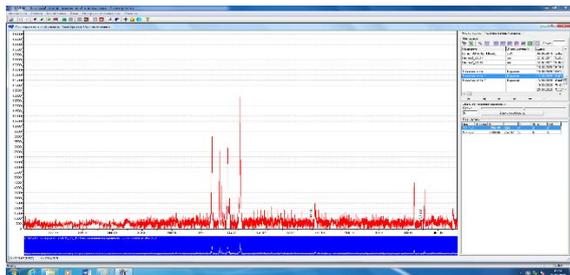


Рисунок 1 – Общий вид главного окна ПО ЛАЭМС

При помощи ПО ЛАЭМС производится:

- инициализация контроллеров шаговых двигателей (приводы перемещения предметного столика), источников света (двухимпульсный лазерный источник с полупроводниковой накачкой, п/п лазер, светодиод), полихроматора с системой регистрации на основе SDH-I;
- управление полихроматором с системой регистрации;
- управление видеокамерой микроскопа для получения и анализа изображений объекта и/или его участков, управление шаговыми двигателями для выбора области регистрации;
- управление лазером прицеливания для точного позиционирования места воздействия лазерных импульсов;

- управление светодиодом подсветки для улучшения идентификации объектов на изображении с видеокамеры микроскопа;
- управление прыгающим зеркалом для направления светового потока в систему регистрации;
- управление двухимпульсным лазерным источником с полупроводниковой накачкой для испарения пробы в выбранных участках объекта, регистрация спектра свечения плазмы;
- исследование полученного спектра, проведение качественного и количественного анализа состава материала;
- сохранение полученных данных на накопитель ЭВМ;
- загрузка сохраненных данных с накопителя ЭВМ и их анализ средствами ПО ЛАЭМС.

Среди основных достоинств ПО ЛАЭМС следует отметить, встроенную базу данных спектральных линий, на основании которой могут быть созданы методики качественного и количественного элементного анализа образцов с количеством определяемых химических элементов до 50. А также возможность независимой программной установки энергии импульсов двухимпульсного лазера (от 0 до 100 мДж).

#### Литература

1. Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Fundamentals and Applications / Eds. A.W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – Cambridge University Press, 2006. – 620 p.
2. Воропай Е.С., Гулис И.М., Зажогин А.П., Шевченко К.А., Радько А.Е., Кирсанов А.А., Купре-ев А.Г., Самцов М.П., Тарасов Д.С. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой Приборостроение–2019 // Материалы 12-й Международной научно-технической конференции. 13–15 ноября 2019. – Минск. Изд.: БНТУ. – С. 390–392.

УДК 681.944

## ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Алексеев В.А., Усольцева А.В., Усольцев В.П.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова  
Ижевск, Российская Федерация*

В настоящее время номенклатура материалов, применяемых в приборостроении, чрезвычайно велика и составляет несколько тысяч марок. В процессе конструирования приходится решать очень сложные задачи выбора материалов, наиболее полно отвечающих часто противоречивым требованиям [1].

Широкое распространение в приборостроении получило стекло, употребление стекла обусловлено неповторимым и своеобразным сочетанием физических и химических свойств. В приборостроении стекло применяется в пере-

менных и постоянных конденсаторах, в катушках самоиндукции, в вакуумных приборах, используют для производства подложек микромодулей печатных схем, малогабаритных конденсаторов, высоковольтных и высокочастотных изоляторов, приборов с ультрафиолетовым излучением, световых ячеек, световодов вычислительных машин, для волокон и стеклотканей, светофильтров, в том числе с переменным пропусканием. Из стекла изготавливаются защитные стекла для приборов, применяемые для предохранения механизма приборов от загряз-

нений, механических повреждений, проникновения пыли и брызг жидкости.

В состав стекол входят стеклообразующие окислы кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка, натрия, калия, лития, кальция, магния, бария, алюминия, железа, титана, бериллия и др. В зависимости от основного используемого стеклообразующего вещества, стекла бывают оксидными (силикатные, кварцевые, германатные, фосфатные, боратные), фторидными, сульфидными и так далее. В зависимости от химической природы стеклообразующего вещества стекла делят на силикатные ( $\text{SiO}_2$ ), алюмосиликатные ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ), алюмоборосиликатные ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ ), алюмофосфатные ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ ) и др. По содержанию модифицирующих веществ стекла бывают щелочными (содержащими окислы  $\text{NaO}_2$ ,  $\text{KO}_2$ ), бесщелочными и кварцевыми [2].

Наряду со стеклом в приборостроении широко применяется органическое стекло. Органическое стекло, или полиметилметакрилат – продукт полимеризации метилметакрилата. Оно полностью состоит из термопластичной смолы. Органическое стекло – техническое название прозрачных в видимой части спектра полимерных материалов на основе органических полимеров,  $[\text{-CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)\text{-}]_n$ , к ним относятся: полиметилметакрилат и другие поли(мет)акрилаты, полистирол, поликарбонаты, полимеры аллиловых соединений и др. Для достижения требуемых эстетических свойств органического стекла, на этапе производства в сырье добавляют различные синтетические добавки (пластификаторы) [3].

Широкое применение оргстекла обусловлено его уникальными характеристиками. Оно в 2,5 раза легче обычного стекла, отличается высокой пластичностью, ударопрочностью, стойкостью к химическому и радиационному воздействию. Показатель светопропускания оргстекла достигает 92–93 %, при этом степень прозрачности не изменяется со временем. Высокие электроизоляционные свойства, химическая стойкость, хорошая светопрозрачность определили применение этого материала в приборах, в медицинской промышленности, при протезировании, в светотехнической промышленности, в ансамблях с драгоценными камнями и драгоценными металлами и т. д. Особенно эффективно производство художественно-промышленных изделий из прозрачных материалов в часовой и ювелирной промышленности [4].

Учитывая особенности приборостроения: меньшие габариты деталей; высокую абсолютную точность изготовления, повышенную точность формы детали, более высокие требования по взаимному расположению поверхностей и осей, наиболее подходящей технологией для обработки деталей и поверхностей является лазер-

ная обработка. Лазерная обработка материалов не только обеспечивает новый уровень качества и скорости обработки в традиционных технологических операциях, но и создает предпосылки для принципиально новых конструкторских и технологических решений в приборостроении и других областях промышленности [5]. Возможности повышения производительности труда, экономии материалов, энергоресурсов, обеспечение быстрой переналадки производств делают задачу массового внедрения лазерных технологий чрезвычайно актуальной.

Несмотря на применение большой номенклатуры оптических материалов и широкие возможности лазерных технологий, лазерная обработка в приборостроении применяется недостаточно широко. Одной из проблем является отсутствие методики проектирования технологических процессов получения заданных параметров обработки с учетом возможностей лазерной технологии. На стадии подготовки производства возникают проблемы, связанные с выбором наиболее эффективных режимов, проведения расчетов экономической целесообразности, а также поиска направлений совершенствования технологии, характеристик текстуры, рельефа, отклонения профиля поверхностей. Поэтому в настоящее время конструктора и технологи вынуждены совершенствовать дизайн, разрабатывать технологию лазерной обработки опытным путем, часто разработчикам не удается реализовать замысел, предусмотренным проектом, в связи с недостаточной изученностью возможностей технологии и отсутствием конкретных рекомендаций для ее разработки.

Для выбора универсальных режимов лазерной обработки прозрачных материалов проведены эксперименты с воспроизведением ступенчатого клина [7] при ступенчатом изменении параметров излучения. Для исследования закономерностей, которым подчиняются реальные технологические процессы, на каждой ступени проведена статистическая оценка качества поверхности после обработки. Найденные закономерности имеют не только теоретическую ценность, они могут широко применяться на практике в планировании, управлении и прогнозировании.

Эксперимент проводился с использованием лазерной установки Trotec Speedy 100R с изменением одного из параметров от минимального до максимального с 15 градациями (мощности лазерного излучения, скорости перемещения лазерного луча, разрешающей способности наносимых изображений (количества точек на линейный дюйм), частоты повторения импульсов, угла падения), когда другие остаются постоянными.

Полученные образцы полутонного клина на кварцевом и органическом стекле в результате скачкообразного изменения мощности представлены на рисунках 1 и 2.



Рисунок 1 – Полученный образец полутонного клина на кварцевом стекле



Рисунок 2 – Полученный образец полутонного клина на органическом стекле

Статистическая обработка результатов, полученных с использованием микроинтерферометра МИИ – 4, блескомера ФБ-2, денситометра ДНС-2, экспертного опроса, показали, что для получения стабильного контура резки, высокохудожественного четкого и контрастного вида изображений, необходимой адгезии при заполнении изображения красителем, оптимальны следующие режимы лазерной обработки оптических материалов: мощность лазерного излучения 6 Вт, скорость лазерного гравирования 27,0 см/сек, разрешающая способность 500 dpi, частота импульсов 1000 Гц, диаметр сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм.

Проведенные исследования показали, что для универсальности технологических режимов лазерной обработки прозрачных материалов перспективно использовать рекомендованные режимы. Образцы применения рекомендованных режимов лазерной обработки хрусталя и акрила представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Применение лазерной обработки материалов в подарке молодоженам и письменном приборе [6]

#### Литература

1. Бутовский К.Г. Материалы приборостроения / К.Г. Бутовский А.В. Лясникова, Н.В. Протасова и др. – Саратов: Изд-во Саратов. техн. ун-та, 2005. –236 с.
2. Гормаков А.Н. Материаловедение и технология обработки конструкционных материалов в приборостроении / А.Н. Гормаков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 340 с.
3. Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 384 с.
4. Приборостроение – XX век. / Сост. М.С. Шкабардия. М.: Совершенно секретно, 2004. – 768 с.
5. 提高使用激光技术进行识别的效率. Alekseev V.A., Usoltseva A.V., Usoltsev V.P. Increase in efficiency of use of laser technologies for identification / 上合组织国家的科学研究：协同和一体化 国际会议 参与者的英文报告 International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” Part 1: Participants’ reports in English 2019年12月11日。中国北京 December 11, 2019. Beijing, China, 2019 PRC, 2019. – 149–156 p. DOI: 10.34660/INF.2019.22.43468
6. Прибор письменный настольный. Усольцева А.В., Усольцев В.П., Черных М.М. Патент на промышленный образец RU 109645, 16.07.2018. Заявка № 2017500418 от 19.06.2017.

УДК 681.7.023.72

### СПОСОБ, ПОВЫШАЮЩИЙ ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ЕГО КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Филонова М.И.<sup>1</sup>, Козерук А.С.<sup>1</sup>, Р.О. Диас Гонсалес<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо  
Мерида, Венесуэла

При обработке конических поверхностей в машиностроении используют в основном методы обработки в условиях геометрического замыкания на токарных станках.

Такая технология ввиду наличия вибрации в технологическом оборудовании не позволяет получить конические поверхности с высокой степенью точности ее образующей (прямолинейности и правильной геометрической формы поперечного сечения по всей высоте конуса с по-

грешностью не более  $\pm 0,25$  мкм [1, 2]). Упомянутых недостатков можно избежать, если использовать метод свободного притирания.

Однако недостатком технологии обработки конических поверхностей по методу свободного притирания является непостоянство скорости вращения заготовки вокруг собственной оси симметрии, поскольку эта скорость обусловлена наличием между обрабатываемой поверхностью и рабочей поверхностью инструмента сил тре-