На правах рукописи

Лябин Николай Александрович

СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ НА ПАРАХ МЕДИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ МИКРООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Специальность:05.02.07–Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва, 2015

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина»

Официальные оппоненты: **ВЕЙКО Вадим Павлович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Лазерных технологий и экологического приборостроения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики

ВАСИЛЬЦОВ Виктор Владимирович
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Термических лазерных технологий Института проблем лазерных и информационных технологий РАН

ТУРИЧИН Глеб Андреевич
доктор технических наук, профессор, декан факультета Технологии исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Защита состоится «8» 04 2015 г. в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском государственном техническом университете им. н.э.Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: (499)267-09-63

Автореферат разослан «28» 01 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д.т.Н., доцент В.П. Михайлов

041 1

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Развитие электронной промышленности, с дальнейшей миниатюризацией электронных компонентов и применением новых материалов, выдвигает все более жесткие требования к качеству, надежности и конкурентоспособности выпускаемых изделий. Что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к параметрам составных элементов, диктуя тем самым создание новых технологий и технологических процессов. Особое признание получили лазерные технологии по микрообработке. При этом функцию обрабатывающего инструмента выполняет высокоинтенсивное сфокусированное световое пятно. Для обеспечения высокого качества обработки инструмент должен обеспечивать следующие параметры – микронную ширину реза (1-20 мкм), минимальные зону термического воздействия ($\leq 3\ldots5$ мкм) и шероховатость ($\leq 1\ldots2$ мкм). В качестве источников излучения в оборудовании по микрообработке могут эффективно использоваться и уже используются короткоимпульсные, высокочастотные, с малой энергией в импульсе и малым коэффициентом отражения лазеры видимого и ультрафиолетового спектра излучения: твердотельные, эксимерные, азотные и, в частности, лазеры и лазерные системы на парах меди (ЛПМ и ЛСПМ).

ЛПМ и ЛСПМ с длинами волн излучения $\lambda = 510{,}6$ и $578{,}2$ нм, короткой длительностью импульсов ($\tau_{имп.}$ = 20-40 нс) и большим усилением активной среды (k = 10^1-10^2 Дб/м), съёмом средней мощности с одного активного элемента (АЭ) до 750 Вт, высокими частотами повторения импульсов (f = 5-30 кГц) и низкой импульсной энергией (W = 0,1-10 мДж) остаются на сегодня самыми мощными импульсными источниками когерентного излучения в видимой области спектра. При этих параметрах лазера и при условии формирования излучения однопучковой структуры с дифракционным качеством плотность пиковой мощности в сфокусированном световом пятне (d = 5-20 мкм), даже при относительно малых значениях средней мощности ($P_{изл}$ = 1-20 Вт), достигает очень высоких значений – $\rho = 10^{10}$-10^{12} Вт/см^2, достаточных для качественной и производительной микрообработки в испарительном режиме металлических материалов и большого круга диэлектриков и полупроводников.

Для реализации преимуществ импульсного излучения ЛПМ в технологии по прецизионной микрообработке материалов и других современных технологий необходимо создание нового поколения высокоэффективных промышленных ЛПМ и ЛСПМ. Внедрение технологии лазерной микрообработки в производство изделий электронной техники (ИЭТ) позволяет, по сравнению с традиционными способами обработки, включая электроэрозионную обработку (ЭЭО), сократить цикл подготовки производства, на порядок и более увеличить производительность, исключить механическое давление инструмента и термическое воздействие, повысить качество и ресурс выпускаемой продукции.

Поэтому исследования, направленные на создание современных промышленных ЛПМ и ЛСПМ с высоким качеством излучения и на их основе технологического оборудования и технологий прецизионной микрообработки являются актуальными.

Целью диссертационной работы является создание современных промышленных, с высокими эффективностью, надежностью и качеством излучения импульсных ЛПМ и ЛСПМ со средней мощностью излучения 1-100 Вт; и на их основе технологического оборудования и технологий прецизионной микрообработки материалов ИЭТ.

МГТУ
им Н Е Баумана

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи.

1. Провести обзор зарубежной и отечественной литературы о состоянии и развитии ЛПМ, работающих в режиме отдельного генератора, и мощных ЛСПМ, работающих по эффективной схеме задающий генератор – усилитель мощности (ЗГ – УМ), и создаваемого на их основе технологического оборудования для микрообработки материалов ИЭТ

2. Разработать и исследовать новое поколение высокоэффективных, долговечных и со стабильными параметрами промышленных отпаянных лазерных АЭ на парах меди со средней мощностью излучения 1-100 Вт. Провести оптимизацию АЭ по мощности излучения и КПД от потребляемой мощности, давления буферного газа и добавок водорода, ЧПИ и характеристик импульсов тока накачки.

3. Создать и исследовать высокоэффективные и надежные схемы исполнения высоковольтного модулятора ИП с наносекундной длительностью импульсов накачки.

4. Исследовать и разработать высокоселективные оптические резонаторы и системы по формированию в ЛПМ и мощных ЛСПМ однопучкового излучения дифракционного качества и со стабильными параметрами для достижения высоких пиковых плотностей мощности (10^9-10^{12} Вт/см^2).

5. Исследовать свойства активной среды (АС) ЛПМ и разработать на их основе методы и устройства для оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения.

6. Разработать на базе нового поколения отпаянных АЭ, новых высокоселективных оптических систем, электрических схем и методов управления параметрами излучения промышленные технологические ЛПМ и ЛСПМ мощностью излучения 1-100 Вт с высокими надежностью, эффективностью и качеством излучения.

7. Создать современное автоматизированное лазерное технологическое оборудование (АЛТУ) типа «Каравелла» на базе промышленных ЛПМ и ЛСПМ и современных прецизионных трехкоординатных столов XYZ для производительной и качественной прецизионной лазерной микрообработки материалов.

8. Определить оптимальные плотности пиковой и средней мощностей излучения ЛПМ для эффективной микрообработки фольговых (0,01-0,2 мм) и тонколистовых (0,2-1 мм) материалов. Исследовать зависимость скорости обработки от толщины материала.

9. Разработать методы химической обработки для очистки зоны лазерного реза от шлаков и грата для высокотеплопроводных и тугоплавких металлов, сплавов и других материалов, широко применяемых в ИЭТ.

10. Исследовать качество поверхности лазерного реза и структуру зоны термического воздействия для тугоплавких и высокотеплопроводных материалов от параметров обработки: скорости, числа проходов и мощности излучения.

11. Показать на конкретных примерах преимущества лазерной микрообработки на АЛТУ «Каравелла» перед традиционными способами изготовления прецизионных деталей ИЭТ.

Методики исследований. Для экспериментальных исследований использованы стандартные и специально разработанные электрические, оптико-физические, химические, масс-спектральные методы и методы оптической и электронной микроскопии, осуществляемые на созданных экспериментальных стендах с помощью стандартных приборов, устройств и элементов.

Основные эксперименты проводились с использованием собственного производства промышленных отпаянных саморазогревных АЭ импульсного ЛПМ с

рабочей температурой 1500-1700 °С моделей ГЛ-204, ГЛ-206Д и ГЛ-206И с уровнем мощности 5-20 Вт (серия «Кулон») и моделей ГЛ-201, ГЛ-205А, ГЛ-205Б и ГЛ-205В мощностью 30-55 Вт (серия «Кристалл») и экспериментальных АЭ типа ГЛ-201Д, ГЛ-201Д32, «Кристалл LT-75» и «Кристалл LT-100» мощностью 40-100 Вт, неустойчивых оптических резонаторов. Разогрев и возбуждение АЭ осуществлялись от высоковольтных импульсных ИП с применением тиратронных, ламповых и транзисторных коммутаторов.

Экспериментальные исследования характеристик высоковольтных импульсов накачки АЭ: импульсов напряжения и тока производились с помощью калиброванных делителя напряжения и трансформатора тока и осциллографов типа С1-75 и цифрового GDS-840S, температуры разрядного канала – оптического пирометра «Проминь», давления газов неона и водорода – манометра ЭКВМ-1У и U-образным калиброванного манометра, энергетических, пространственных и временных характеристик выходного излучения – датчика мощности лазерного излучения ТИ-3 с подключенным к нему милливольтметром М136, фотоэлемента типа ФЭК-14К с наносекундным разрешением и осциллографа GDS-840S, частотомера Ч3-34А, запоминающего осциллографа С7-8А, анализатора пучка излучения Beam Star-FX, фокусирующих зеркал и линз, поворотных зеркал светоделительных пластин и ослабителей мощности. Исследования изменения состава активного вещества меди в отпаянном АЭ после длительных испытаний проводились методом химического анализа и с помощью масс спектрометров типа МС-7201М и МИ-1201. Анализ качества лазерной микрообработки материалов импульсным излучением ЛПМ проводился с помощью современных оптических микроскопов: измерительного VMM-200 и Leica, проекционного PV-5100 и растрового электронного (РЭМ). Теоретические исследования динамики и физических процессов формирования пространственно-временной структуры импульсного излучения ЛПМ основывались на законах геометрической оптики и теории дифракции.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

1. Создано, на основе комплекса новых научно-технических, технологических и схемных решений, новое поколение промышленных с высокими эффективностью, надежностью и качеством излучения отпаянных лазерных АЭ на парах меди, ЛПМ и ЛСПМ со средней мощностью излучения 1-20 Вт и 30-100 Вт. Эти промышленные приборы превосходят зарубежные аналоги по съему мощности излучения с единицы активной среды в 2-4 раза и минимальной наработке в 4-5 раз.

2. Исследованы закономерности динамики формирования излучения импульсного лазера на парах меди при работе в режиме генератора с оптическими резонаторами. Впервые показано, что выходное излучение имеет многопучковую структуру: 2 пучка сверхсветимости и 2-4 пучка, сформированных непосредственно резонатором, количество которых определяется временем существования инверсии населенностей в активной среде (20-40 нс). Причем каждый пучок обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками.

3. Установлено, что для эффективной микрообработки материалов в испарительном режиме импульсным излучением ЛПМ необходимо формирование однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и плотностью пиковой мощности 10^9-10^{12} Вт/см^2 в сфокусированном световом пятне диаметром 5-20 мкм. Такое качество излучения достигается при использовании в ЛПМ и ЛСПМ новых оптических режимов работы с неустойчивым резонатором: с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическим в сочетании с пространственным фильтром-коллиматором.

4. Исследованы физические свойства активной среды импульсного ЛПМ и впервые установлено, что в отношении к собственному излучению активная среда имеет четыре, последовательно идущие друг за другом и повторяющиеся от импульса к импульсу, характерные временные зоны: слабого поглощения ($\tau = 20...30$ нс), усиления ($\tau = 30...40$ нс), полного поглощения ($\tau > 1000$ нс) и максимальной прозрачности ($\tau > 1000$ нс). На основании этого созданы методы и устройства для автоматизированного управления режимами лазерной микрообработки посредством изменения инверсии населенностей активной среды.

Практическая значимость работы. Результаты работы были использованы при разработке, исследовании и производстве промышленных отпаянных саморазогревных АЭ на парах меди, оптических резонаторов и систем, электрических схем, методов и устройств оперативного управления параметрами излучения, промышленных импульсных ЛПМ и ЛСПМ, на их основе экспериментального и современного промышленного технологического оборудования и технологий прецизионной микрообработки материалов для ИЭТ:

– Импульсных ЛПМ первого поколения «Криостат» (ЛГИ-201 – по ТУ) с отпаянным АЭ модели ГЛ-202 и ЛПМ «Курс» (ЛГИ-202) с отпаянным АЭ «Кристалл» модели ГЛ-201 **(пат. № 1813307А3)**;

– Импульсной ЛСПМ «Карелия» с двумя отпаянными АЭ «Кристалл» модели ГЛ-201;

– Лабораторной технологической установки «ЭМ-5029» на базе ЛСПМ «Карелия» для скоростного изготовления фотошаблонов;

– Экспериментальной технологической установки ЭЛТУ «Каравелла» на базе ЛСПМ «Карелия» для исследований возможности микрообработки материалов ИЭТ;

– Нового поколения промышленных отпаянных АЭ импульсного ЛПМ малого уровня мощности (1-20 Вт) серии «Кулон» – ГЛ-206А, ГЛ-206Б, ГЛ-206В, ГЛ- 206Г, ГЛ-206Д и ГЛ-206И **(пат. № 20617, № 2191452)**;

– Нового поколения промышленных отпаянных АЭ на парах меди среднего уровня мощности (30-100 Вт) серии «Кристалл» – ГЛ-205А, ГЛ-205Б, ГЛ-205В LT-75 и LT-100 **(пат. № 20617, № 2191452, № 30468, и № 35177)**;

– Новых оптических резонаторов и систем для формирования однопучкового излучения дифракционного качества со стабильными параметрами **(А.с. № 1438549, пат. № 44004, № 1565320 и №2432652)**;

– Методов оперативного управления выходными параметрами излучения ЛПМ и ЛСПМ по заданному алгоритму на основе исследований свойств активной среды;

– Промышленных ЛПМ и ЛСПМ серии «Кулон» на основе нового поколения АЭ «Кулон» ГЛ-206 и Кристалл» ГЛ-205 и новых оптических систем с оперативным управлением параметрами выходного излучения от ПК совместно с ООО «НПП «ВЭЛИТ», г. Истра МО **(пат. № 2226022 и № 2251179)**;

– Мощных ЛСПМ типа ЗГ – УМ на основе нового поколения АЭ ГЛ-205А, ГЛ-205Б и ГЛ-205В и новой оптической системы для технологических установок по разделению изотопов в РНЦ «Курчатовский институт» (Москва), Институте физики полупроводников (г. Новосибирск), **(пат. № 2264011)**;

– Современных автоматизированных лазерных технологических установках (АЛТУ) «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» на базе ЛСПМ «Кулон-10» и «Кулон-20» для прецизионной микрообработки тонколистовых материалов толщиной 0,3-1 мм для ИЭТ, в частности, ЭВП СВЧ-техники и точного приборостроения **(пат. № 2264011)**;

– Современных автоматизированных лазерных технологических установках (АЛТУ) «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» на базе ЛСПМ «Кулон-06» для прецизионной микрообработки фольговых материалов толщиной 0,01-0,3 мм для ИЭТ, в частности, ЭВП СВЧ-техники и точного приборостроения **(пат. № 2251179)**;

– Технологий высокопроизводительной и качественной прецизионной микрообработки излучением ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов как высокотеплопроводных (Cu, Al, Ag, Au), так и тугоплавких (Mo, W, Ta, Re) и других(Ni, Ti, Zr, Fe, Pb) металлов, их сплавов, большого круга полупроводников и диэлектриков (Si, Ge, GaAs, Al_2O_3, 22ХС, сапфира, искусственного алмаза, стекла, кварца), графита и композиционных материалов толщиной 0,01-1 мм.

Общий объем продаж промышленных отпаянных лазерных АЭ на парах меди нового поколения серии «Кулон» и «Кристалл» составил около 560 шт., импульсных ЛПМ «Курс» и «Кулон» – 30 шт., ЛСПМ «Карелия» – 15 шт., автоматизированных лазерных технологических установок «Каравелла» – 7 шт.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы и отдельные её положения доложены и обсуждены на всероссийских и международных научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах:

- Семинарах и симпозиумах «Лазеры на парах металлов и их применение» (г. Ростов-на-Дону, 1991 г., 1993 г., 1996 г., 1998 г., 2000 г., 2002 г., 2004 г., 2006 г., 2008 г., 2010 г., 2014 г.);
- 2-7, 9, 10, 12, 14-ой Международных научных конференциях «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» (г. Звенигород, 1997-2002 гг., 2004 г., 2008 г., 2010 г., 2014 г.);
- VIII, XII , XIV-XIX, XXII-ой Международных научно-технических конференциях «Лазеры в науке, технике, медицине» (г. Пушкинские Горы-1997 г., Сочи -2001 г., Адлер-2003-2008 гг., Геленджик-2011 г., Туапсе-2013 г., Туапсе-2014 г.);
- III Международной конференции «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (г. Томск, 1997 г.);
- Международной конференции «Комбинационное рассеяние – 70 лет исследований» (Москва, 1998 г.);
- The International conference «Lasers'98» (Tucson, Arizona, 1998 г.), «Lasers'99» (Quebec, Canada, 1999 г.), «Lasers'2000» (Albuquerque, New Mexico, 2000 г.);
- Научно-техническом семинаре ЛАС «Лазерные технологии и технологическое оборудование» (Москва, 1999 г.);
- The International conference «Atomic and molecular pulsed lasers» (Tomsk, 1999 г., 2003 г., 2010 г.);
- Международной конференции по люминесценции (Москва, 2001 г.);
- VIII симпозиуме «Электротехника 2010» (г. Москва, 2005 г.);
- Technical Digest ICONO (Minsk, Belarus, 2007 г.);
- Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в науке, технике и образовании» (г. Кемер, Турция, 2008 г., г. Таба, Египет, 2009 г.);
- Молодежной школе-конференции с международным участием «Лазеры и лазерные технологии» (г. Томск, 2010 г.);
- Международной оптической выставке «OVC Expo'2006» и «OVC Expo'2011» (г. Ухань, Китай, 2011 г.);
- Научно-технических конференциях и семинарах по «СВЧ-электронике» ФГУП «НПП «Исток» (г. Фрязино, 2005-2013 гг.);

• Сессии-симпозиуме «Московский межотраслевой альянс главных сварщиков и главных специалистов по резке и металлообработке» (Москва, 2013 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 129 научных работ, в том числе 1 монография, 36 статей в ведущих рецензируемых журналах по перечню ВАК РФ, 4 статьи в журнале SPIE. Получено 12 патентов РФ и 1 авторское свидетельство СССР.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов и списка литературы. Общий объем – 415 страниц, включая 34 таблицы, 212 рисунков и список литературы из 406 наименований, из них 129 работы автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана характеристика импульсным ЛПМ и ЛСПМ и показана, методом сравнительного анализа с известными коммерческими газовыми и твердотельными лазерами, перспективность их использования для прецизионной микрообработки материалов ИЭТ и других современных применений. Раскрыта актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, приведена научная и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор зарубежных и отечественных работ о состоянии и развитии импульсных ЛПМ, работающих в режиме отдельного генератора, и мощных ЛСПМ, работающих по схеме ЗГ – УМ, и рассмотрены их технологические возможности для прецизионной микрообработки материалов. Впервые генерация в ЛПМ была получена в 1966 году группой американских исследователей: M. Piltch, W.T. Walter и др. В России первые успехи в исследовании физических свойств и определении областей применения ЛПМ достигнуты учеными Физического института им П.Н. Лебедева РАН: Петрашем Г.Г., Исаевым А.А., Казаряном М.А. Одновременно, основываясь на результаты работ этих групп, в научно-производственном предприятии «Исток» проводились разработки первых промышленных отпаянных ЛПМ. Заметный вклад в развитие этого направления внесли также работы Солдатова А.Н., Евтушенко Г.С., Бохана П.А., Вейко В.П., Либенсона М.Н., Григорьянца А.Г., Скрипниченко А.С., Гликина Л.С., Little C.E., Sabotinov N.V., Piper D. и др.

Отечественный приоритет по созданию коммерческих ЛПМ, к которым относятся лазеры малого (1-20 Вт) и среднего (30-120 Вт) уровней мощности излучения, и на их основе технологического оборудования для прецизионной микрообработки материалов ИЭТ принадлежит ОАО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино МО) совместно с ООО «НПП «ВЭЛИТ» (г. Истра МО) и ЗАО «Чистые технологии» (г. Ижевск) при научной поддержке Физического института им П.Н. Лебедева РАН. В доперестроечный период весомый вклад в технологию микрообработки внесли сотрудники НИИ «Точного машиностроения» (г. Зеленоград), создав ряд уникальных установок. Исследования продолжаются в Институте общей физики РАН им. А.Н. Прохорова (Москва), ТГУ и Институте оптики и атмосферы СО РАН (г. Томск), Институте физики полупроводников (г. Новосибирск), ООО «НПО «Мехатрон», Санкт-Петербургском государственном Политехническом Университете, Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики, МГТУ им. Н.Э. Баумана и ОИВТ РАН (Москва). За рубежом наиболее известными производителями коммерческих ЛПМ являются Oxford Lasers (Англия), университет Маккуари (Австралия), «Pulse Light» (Болгария), по мощным ЛСПМ, предназначенных

для технологии разделения изотопов, – Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса (США), где средняя мощность доведена до 72 кВт, в России – РНЦ «Курчатовский институт».

Анализ результатов первых экспериментальных работ на технологических установках ЭЛТУ «Каравелла» и ЭМ-5029 (ОАО «НПП «Исток» им. Шокина»), «Луч» (НИИ «Точного машиностроения») и MP200X (Oxford Lasers) показал, что для достижения высокоэффективной микрообработки материалов ИЭТ импульсные ЛПМ и ЛСПМ должны обладать не только высокими надежностью и мощностью, но и высоким качеством излучения и плотностью пиковой мощности 10^9-10^{12} Вт/см^2 в сфокусированном световом пятне размером 10-30 мкм. Для достижения такого качества излучения в ЛПМ необходимо формировать излучение с однопучковой (одномодовой) структурой и минимальной (дифракционной) расходимостью, высокой стабильностью положения оси диаграммы направленности и импульсной энергии, гауссовым распределением интенсивности в дальней зоне. Отсюда вытекают и все основные задачи, которые необходимо решить для выполнения поставленной в данной диссертационной работе цели. Формулировки задач представлены в разделе «Цель диссертационной работы».

Во второй главе, в первой ее части, рассмотрены результаты разработки, исследований и оптимизации параметров нового поколения высокоэффективных и долговечных промышленных отпаянных лазерных АЭ на парах меди серии «Кулон» малого (1-20 Вт) и «Кристалл» среднего (30-100 Вт) уровней мощности излучения, работающих в импульсном режиме в смеси паров меди, буферного газа неона и водорода. Эти АЭ являются основным элементом лазера для микрообработки.

За основу конструкции как первых моделей, так и нового поколения отпаянных АЭ серии «Кулон» и «Кристалл» с рабочей температурой разрядного канала 1600-1700 °С взята конструкция саморазогревного АЭ с внутривакуумным расположением теплоизолятора, предложенная сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и ОАО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино). Конструкция (Рис. 1), технология обезгаживания и очистки после обезгаживания разработанных промышленных

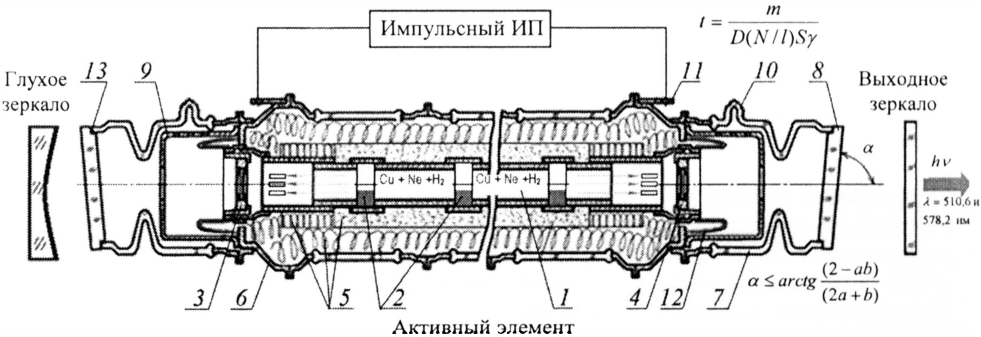


Рис. 1. Конструкция промышленных отпаянных саморазогревных лазерных АЭ на парах меди: 1 – секционированный керамический разрядный канал с глухими пазами ($T_{раб}$ = 1600-1700 ^{0}С); 2 – генераторы паров меди в глухих пазах; 3 и 4 – кольцевые безнакальный автотермоэмиссионный металлопористый W-Ba катод и молибденовый анод; 5 – трехслойный высокотемпературный теплоизолятор; 6 – металлостеклянная вакуумноплотная оболочка; 7 – концевые стеклянные секции; 8 – окна для выхода излучения; 9 – экраны-ловушки; 10 –штенгели, 11 – металлические лепестки; 12 – токовводы в виде петли; 13 – клей термостойкий. Патенты РФ: № 2191452, № 35177, № 30468 и № 20617

отпаянных АЭ серии «Кулон» и «Кристалл» идентичны и отличаются лишь размерами функциональных узлов и временем обезгаживания и очистки. Мощность каждой отдельной модели АЭ определяется в конечном итоге диаметром и длиной разрядного канала. Диаметр и длина разрядного канала АЭ «Кулон» со средней мощностью излучения 1 Вт составляют 7 и 140 мм, мощностью 5 Вт – 12 и 340 мм, 20 Вт – 14 и 625 мм, АЭ «Кристалл» мощностью 30 Вт – 20 и 930 мм, 55 Вт – 32 и 1230 мм, 100 Вт – 45 и 1520 мм.

Высокие КПД, мощность, долговечность, качество и стабильность параметров выходного излучения в АЭ «Кулон» и «Кристалл» достигнуты за счет реализации комплекса научно-технических и технологических решений:

– выполнения секционированного керамического разрядного канала с глухими пазами, в каждом из которых устанавливается генератор паров меди в виде молибденовой подложки с отверстиями, смачиваемой активным веществом – расплавленной медью, и перфорированными концевыми трубками (материал керамики – 99,8% Al_2O_3+0,2% MgO);

– разработанной технологии обезгаживания АЭ и восстановления чистоты поверхности генераторов паров меди, электродных узлов и других элементов в атмосфере водорода с неоном при $T_{раб}$= 1600 °С после полного обезгаживания АЭ при T= 1700 °С длительностью 30…60 ч (зависит от модели АЭ);

– создания безнакального автотермоэмиссионного металлопористого вольфрам-бариевого (W-Ba) катода кольцевой конструкции с кольцевой проточкой на внутренней поверхности, обеспечивающего устойчивое локальное горение импульсного дугового разряда (активное вещество – алюмосиликат бария состава $3BaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}0{,}5CaO{\cdot}0{,}5SiO_2$);

– трехслойного высокотемпературного теплоизолятора с низкой теплопроводностью (λ = 0,27-0,31 Вт/(м·К)) и малым удельным весом (ρ = 0,32-0,5 г/см^2) на основе мелкодисперсных окислов Al_2O_3 и SiO_2, размещенного в пространстве между разрядным каналом с $T_{раб} \cong$ 1600 °С, электродными узлами и внешней вакуумноплотной оболочкой с $T_{раб} \cong$ 300 °С;

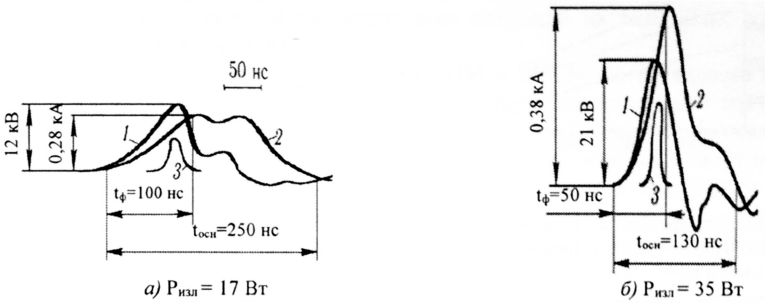
– применения выходных просветленных окон с углом наклона к оптической оси АЭ, не превышающем значений

$$\alpha = arctg\frac{(2-ab)}{(2a+b)}, \qquad (1)$$

где $a = D_к/l_к$ ($D_к$ – диаметр и $l_к$ – длина разрядного канала), $b = D_к/l_{ок}$ ($l_{ок}$ – расстояние от торца разрядного канала до окна вдоль оптической оси. Последнее устраняет обратную паразитную связь с АС и не приводит к искажению структуры выходного излучения.

Исследования по оптимизации параметров излучения АЭ были проведены от потребляемой мощности, давления буферного газа неона и водорода, частоты повторения и характеристик импульсов накачки. В качестве генератора накачки использовался тиратронный ИП, высоковольтный модулятор которого выполнен по схеме емкостного удвоения напряжения с магнитными звеньями сжатия наносекундных импульсов тока и анодным реактором, являющийся по результатам исследований на сегодня самым надежным и простым в эксплуатации и эффективным по условиям возбуждения АС. По сравнению с классической схемой, длительность формируемых импульсов тока укорачивается в 2 раза, с 250-300 нс (Рис. 2,а) до 120-150 нс (Рис. 2,б), что приводит к увеличению мощности излучения также в 2 раза, КПД в 1,5 раза за счет повышения оптимальной рабочей температуры и, как следствие, концентрации паров меди в АС примерно в 2-2,5 раза, увеличивается в несколько раз срок службы

коммутатора-тиратрона (более 2000 ч) и коммутируемая мощность (до 5…10 кВт) за счет снижения в нём потерь мощности.



а) $P_{изл}$ = 17 Вт *б)* $P_{изл}$ = 35 Вт

Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока накачки(2) и излучения (3) ЛПМ при разных схемных исполнениях импульсного модулятора накачки ИП (f = 10 кГц). Патент РФ № 2226022

Добавление в АС ЛПМ водорода с парциальным давлением до 10 мм рт. ст. приводит к увеличению КПД, мощности и оптимальной ЧПИ излучения ЛПМ до 1,5 раза и выше в зависимости от давления неона, диаметра разрядного канала АЭ и условий возбуждения АС (Рис. 3).

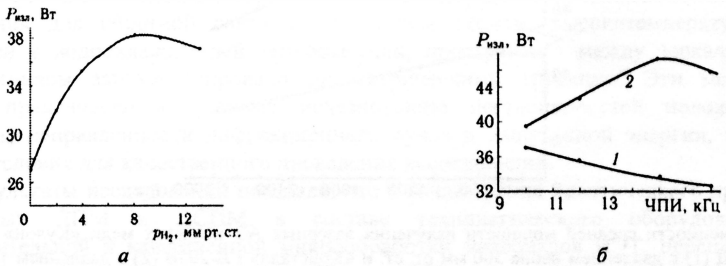


Рис. 3. Зависимость средней мощности излучения ЛПМ с АЭ «Кристалл» модели ГЛ-205Б от парциального давления водорода при ЧПИ 10,5 кГц (*а*) и от ЧПИ без добавки (1) и с добавкой (2) водорода (*б*)

При изменении давления буферного газа неона от 50 до 760 мм рт. ст. и ЧПИ 10 кГц средняя мощность излучения ЛПМ с АЭ «Кулон» модели ГЛ-206Д снижается с 15 до 10 Вт (на 33%), «Кристалл» моделей ГЛ-205А – с 34 до 21 Вт (на 38%), ГЛ-205Б – с 44 до 25 Вт (на 43%), ГЛ-205В – с 56 до 30 Вт (на 47%) (Рис. 4) и ГЛ-205Г – с 8,5 до 5,4 Вт на 36%) (Рис. 4,*а*). С увеличением диаметра и длины разрядного канала АЭ и, соответственно, объема АС относительный спад мощности при увеличении давления неона становится резче. Давление неона в промышленных АЭ выбиралось путем компромиссного решения между долговечностью, мощностью и стабильностью параметров излучения.

Установлено также, что каждая модель АЭ имеет свой оптимальный рабочий диапазон частот, при котором достигаются максимальные уровни мощности излучения и КПД (Рис. 4,*б*).

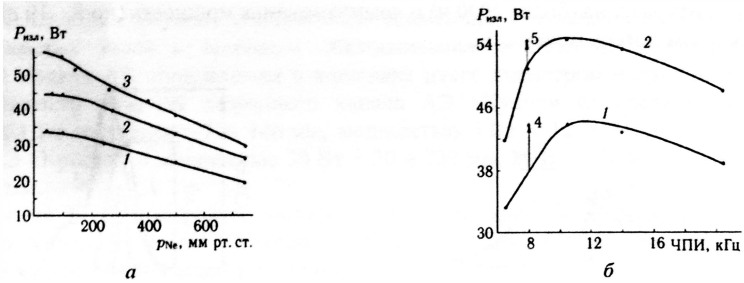


Рис. 4. Зависимость средней мощности излучения ЛПМ с АЭ «Кристалл» ГЛ-205А (1), ГЛ-205Б (2) и ГЛ-205В (3) от давления неона при ЧПИ 10 кГц (а) и от ЧПИ с ГЛ-205Б (1) и ГЛ-205В (2) (б)

Срок службы промышленных АЭ серий «Кулон» и «Кристалл» ЛПМ благодаря высокой надежности всех функциональных узлов и эффективной защите от запыления выходных оптических окон, определяется лишь тремя факторами: массой запасенной меди в генераторах паров меди, рабочей температурой разрядного канала и давлением буферного газа неона и составляет не менее 3000 ч (Рис. 5).

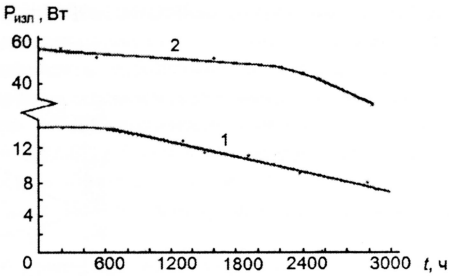


Рис. 5. Зависимости средней мощности излучения лазерных АЭ на парах меди «Кулон» модели ГЛ-206Д (1) с давлением неона 300 мм рт. ст. и «Кристалл» ГЛ-205В (2) с давлением 150 мм рт. ст. от времени наработки

Оптимизированные параметры АЭ импульсного ЛПМ серий «Кулон» и «Кристалл» внесены в ТУ.

Разработанные нового поколения промышленные отпаянные АЭ серии «Кулон» малого (1-20 Вт) и «Кристалл» среднего (30-100 Вт) по эффективности, гарантированной наработке и сроку службы, условиям эксплуатации по отношению к близким зарубежным аналогам более предпочтительны. Съем мощности излучения с единицы активной среды АЭ «Кулон» примерно в 2 раза выше, АЭ «Кристалл» – в 4 раза, гарантированная наработка 4-5 раза больше, а отпаянное исполнение АЭ не требует дополнительных элементов жизнеобеспечения.

Во второй части главы 2 исследованы особенности динамики формирования излучения в импульсном ЛПМ с разными типами оптических резонаторов. Показано, что выходное излучение ЛПМ имеет многопучковую структуру: 2 пучка сверхсветимости и 2-4 пучка, сформированных непосредственно резонатором, количество которых определяется временем существования инверсии населенностей в активной среде (20-40 нс). Причем каждый пучок обладает своими пространственными, временными и

энергетическими характеристиками. Распределение интенсивности излучения с многопучковой структурой в сфокусированном пятне (дальней зоне) имеет ступенчатый (неравномерный) характер, что оказалось не пригодным для качественной микрообработки материалов и препятствовало созданию на базе ЛПМ современного технологического оборудования.

С целью формирования в импульсном ЛПМ и ЛСПМ однопучкового излучения с дифракционным качеством и достижения высоких значений плотности пиковой мощности (10^9-10^{12} Вт/см^2), необходимых для эффективной микрообработки материалов, были проведены исследования с оптическими системами, обладающими высокой пространственной селективностью: в режиме с одним выпуклым зеркалом, неустойчивым резонатором (НР) с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическим НР. Исследования проводились на специально созданной экспериментальной установке. В качестве выходного зеркала в НР с двумя выпуклыми зеркалами применен положительный выпукло-вогнутый мениск с отражающим лазерное излучение пятном (1-1,5 мм) и фокусом, совмещенным с фокусом глухого зеркала (Патент РФ: № 2432652). Последнее является условием коллимирования сформированного НР расходящегося пучка излучения в удобный для практического использования цилиндрический пучок с минимальной расходимостью.

Установка разработана с учетом высокой чувствительности элементов и поля НР и, соответственно, параметров излучения ЛПМ к внешним механическим, акустическим и тепловым воздействиям и воздушно тепловым потокам. В ней применен массивный оптический стол с пневмоизоляторами в качестве несущей всех элементов конструкции, термодатчик для обратной связи с оптическим столом, высокотемпературный АЭ установлен в водоохлаждаемый теплосъемник, пространство между зеркалами НР и теплосъемником загерметизировано диэлектрическими трубками. Эти мероприятия привели практически к полному исчезновению нестабильностей положения оси диаграммы направленности дифракционного пучка и импульсной энергии, т. е. были созданы условия для качественного проведения исследований.

Результаты исследований показали, что с точки зрения практического применения импульсных ЛПМ и ЛСПМ в составе технологического оборудования для производительной и качественной микрообработки материалов ИЭТ, перспективными являются два оптических режима работы: с НР с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическим НР. Так как только с этими НР и при использовании ПФК возможно формирование однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и минимальных диаметров в перетяжке сфокусированного пучка (5-20 мкм) и достижение максимальных значений плотности пиковой мощности (10^9-10^{12} Вт/см^2) для обеспечения микрообработки в испарительном режиме.

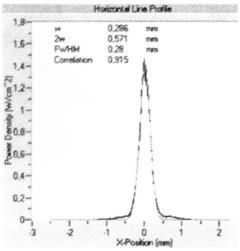
В режиме работы ЛПМ с НР с двумя выпуклыми зеркалами формирование однопучкового излучения с дифракционной расходимостью достигается при выполнении трех взаимосвязанных условий:

$$\frac{l_к}{2} + l_2 < l_1 < \frac{\tau_{инв.} \cdot c}{2} - (l_к + l_2), \qquad (2)$$

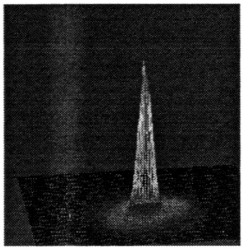
$$R_{1(гл)} < l/(10^1 \ldots 10^2) = 1 \ldots 3 \text{ см}, \qquad (3)$$

$$R_{2(вых)} > R_{1(гл)}, \qquad (4),$$

где l_1 и l_2 – расстояния от зеркал до разрядного канала, $l_к$ – длина разрядного канала, $\tau_{инв}$ – время существования инверсии населенностей, с – скорость света, $R_{1(гл)}$ и $R_{2(вых)}$ – радиусы кривизны глухого и выходного зеркал НР. На рис. 6 показан пример распределения.интенсивности излучения ЛПМ в фокальной плоскости (в дальней зоне)



Распределение интенсивности по сечению пучка



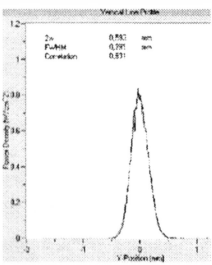
3d-распределение

Рис. 6. Распределение интенсивности излучения ЛПМ с промышленным отпаянным АЭ «Кулон» ГЛ-206Д в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами с радиусом кривизны глухого и выходного зеркал $R_1 = 30$ мм и $R_2 = 70$ мм в фокальной плоскости фокусирующего зеркала с $R = 15$м

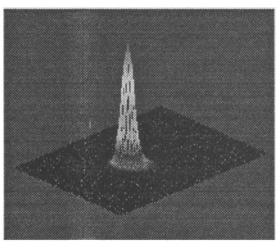
при выполнении в НР этих трех условий. Видно, что структура выходного излучения однопучковая с высокой степенью корреляции с гауссовым пучком (0,915) и имеет дифракционную расходимость (0,1 мрад). Но мощность излучения дифракционного пучка, из-за больших потерь в НР, составляет не более 10% (1-1,5 Вт) от суммарной мощности, плотность пиковой мощности – уровня 10^9 Вт/см^2, что не эффективно для микрообработки материалов толщиной более 0,05…0,1 мм.

Самым весомым применением такого ЛПМ является использование его в качестве ЗГ в ЛСПМ типа ЗГ – пространственный фильтр-коллиматор (ПФК) – усилитель мощности (УМ), когда средняя мощность дифракционного пучка и плотность пиковой мощности излучения с применением в качестве УМ промышленных отпаянных АЭ серии «Кулон» и «Кристалл» увеличивается на 1-2 порядка – до 10-100 Вт и 10^{11}-10^{12} Вт/см^2, что существенно повышает производительность микрообработки и толщину обрабатываемых материалов. Такая ЛСПМ мощностью 20…25 Вт входит в состав созданной современной АЛТУ «Каравелла-1М» для микрообработки материалов толщиной до 1 мм.

В режиме работы ЛПМ с телескопическим НР формирование однопучкового излучения с дифракционной расходимостью достигается при увеличениях резонатора сотни крат (M = 100-300) и применения на выходе ПФК для выделения дифракционной составляющей из многопучковой структуры выходного излучения ЛПМ. На рис. 7



Распределение интенсивности по сечению пучка



3d-распределение

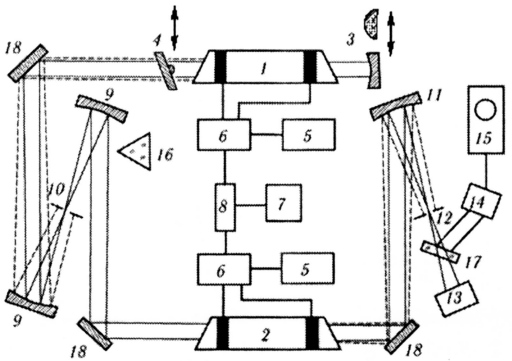
Рис. 7. Распределение интенсивности излучения ЛПМ с промышленным отпаянным АЭ «Кулон» ГЛ-206И в режиме с телескопическим НР с увеличением $M = 220$ в фокальной плоскости фокусирующего зеркала с $R = 15$м

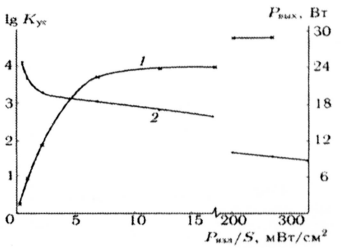
показан пример распределения интенсивности излучения ЛПМ в дальней зоне при M = 220. При этом имеем однопучковое излучение с дифракционной расходимостью (0,1 мрад). Степень корреляции с гауссовым пучком составляет 0,93, что свидетельствует о практическом совпадении угловой и энергетической расходимостей.

ЛПМ с телескопическим НР мощностью излучения 5-8 Вт применяется в созданных АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для микрообработки фольговых материалов толщиной 0,01-0,2 мм и в АЛТУ «Каравелла-1» в качестве ЗГ в составе ЛСПМ мощностью 10-15 Вт для микрообработки материалов толщиной 0,3-0,5 мм.

В третьей части главы 2 исследованы пространственные, временные и энергетические характеристики ЛСПМ, работающей по эффективной схеме ЗГ – УМ, с целью достижения максимальных КПД, мощности и плотности мощности излучения. Исследования проводились на экспериментальной установке, представленной на рис. 8.

Основной характеристикой ЛСПМ, определяющей условия её работы, является зависимость выходных параметров излучения от временной расстройки импульсов излучения ЗГ относительно световых импульсов УМ. Как при опережении, так и при отставании импульсов ЗГ относительно сигналов УМ, мощность излучения ЛСПМ снижается, длительность импульсов укорачивается. В случае отсутствия селектирующей диафрагмы (поз.10) в ПФК в УМ, конкурируя между собой по мощности, усиливаются все составляющие излучения ЗГ и на выходе ЛСПМ имеем усиленную многопучковую структуру, что непригодно для качественной микрообработки. Введение диафрагмы (поз.10), соизмеримой с диаметром дифракционного пятна (0,1-0,15 мм), в фокальную плоскость ПФК приводит к подавлению пучков с большей расходимостью, увеличению мощности в дифракционной составляющей и практического КПД ЛСПМ до максимальных значений.





Зависимость съёма мощности излучения (1) в ЛСПМ с УМ с АЭ «Кристалл» ($D_к$=2 см) и его коэффициента усиления (2) от входной плотности мощности

Рис. 8. Блок-схема экспериментальной ЛСПМ типа ЗГ – ПФК – УМ с применением промышленных отпаянных АЭ «Кулон» и «Кристалл»: 1 – АЭ ЗГ, 2 – АЭ УМ, 3 и 4 – глухое и выходное зеркала НР, 5 – высоковольтные выпрямители, 6 – высоковольтные модуляторы наносекундных импульсов накачки, 7 – генератор задающих импульсов, 8 – наносекундная линия задержки, 9 – зеркала ПФК, 10 и 12 – селектирующие диафрагмы, 11 – фокусирующее зеркало, 13 – милливольтметр с преобразователем мощности лазерного излучения ТИ-3, 14 – фотоэлемент ФЭК-14К, 15 – осциллограф С1-75 и GDS-840S, 16 – стеклянная призма, 17 – светоделительная пластина, 18 – плоские поворотные зеркала

По результатам исследований установлено, что в ЛСПМ, работающей по схеме ЗГ – УМ, максимальные КПД (2-3 %), мощность излучения (≥100 Вт) и плотность пиковой

мощности (10^{12}-10^{13} Вт/см^2) обеспечиваются за счет:

– введения между ЗГ и УМ ПФК, обеспечивающего выделение дифракционной составляющей из многопучкового излучения ЗГ и последующего пространственного согласования с апертурой активной среды УМ;

– синхронизации (совмещения) во времени световых сигналов ЗГ и УМ с точностью не хуже ±2 нс;

– обеспечения уровня плотности мощности излучения на входе УМ не менее 0,2…0,3 Вт/см^2;

– обеспечения стабильности положения оси диаграммы направленности пучка излучения $\Delta\theta \leq \theta_{дифр}/(10^2\text{-}10^3)$.

При максимальных плотностях пиковой мощности (10^{12}-10^{13} Вт/см^2) обеспечиваются максимальная производительность микрообработки и обработка материалов толщиной до 1-2 мм. Существенно повысить мощность излучения ЛСПМ можно путем увеличения количества усилительных АЭ. В результате расчетов установлено, что зависимость мощности излучения ЛСПМ ($P_{ЛСПМ}$), состоящей из одного ЗГ и n одинаковых УМ, от коэффициента пропускания выходных окон ($\tau_{ок}$) имеет следующий вид:

$$P_{ЛСПМ} = P_{ЗГ}\tau_{ок}^{2n+1} + P_{УМ}\frac{\tau_{ок}(1-\tau_{ок}^{2n})}{1-\tau_{ок}^{2}} \qquad (5).$$

На рис. 9 представлена экспериментальная зависимость мощности излучения ЛСПМ от временной расстройки импульсов излучения ЗГ относительно импульсов УМ в пределах ± 1000 нс.

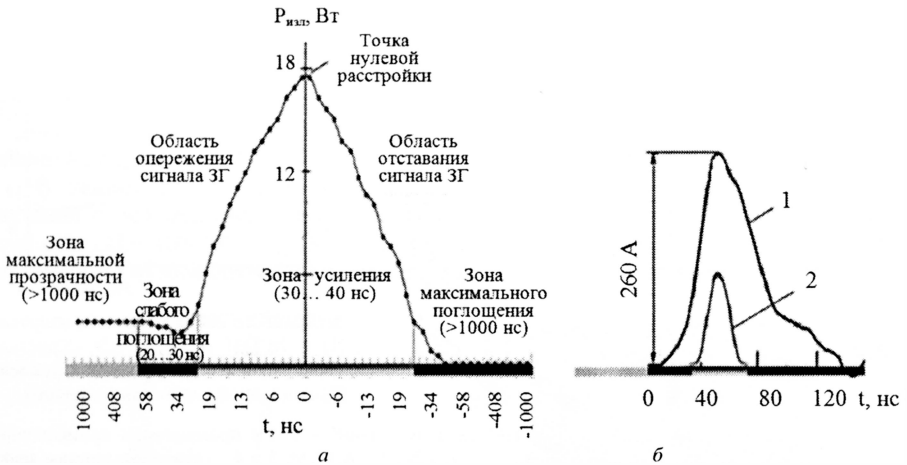


Рис. 9. Зависимость мощности излучения ЛСПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д от временной расстройки импульсов излучения ЗГ относительно импульсов УМ в пределах ± 1000 нс при ЧПИ 13,6 кГц (*а*), осциллограммы импульса тока накачки (1) и излучения (2) при нулевой расстройке (*б*). Патент РФ: № 2264011

Из этой зависимости следует, что АС импульсного ЛПМ в отношении к собственному излучению имеет четыре, последовательно идущие друг за другом и повторяющиеся от импульса к импульсу, характерные временные зоны: слабого

поглощения длительностью 20-30 нс (возникает на начальной стадии развития импульса тока накачки), усиления длительностью 30-40 нс (возникает на крутом переднем фронте импульса тока), полного поглощения длительностью более 1000 нс (возникает на срезе импульса тока) и зона максимальной прозрачности длительностью более 1000 нс (перед новым импульсом тока).

Наличие таких зон в АС импульсного ЛПМ стало основой для разработки методов и электронных устройств оперативного управления мощностью и ЧПИ по заданному алгоритму в созданных промышленных ЛПМ и ЛСПМ и на их основе современных АЛТУ «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов.

В третьей главе представлены результаты разработки и исследований серии современных промышленных технологических ЛПМ, работающих в режиме отдельного генератора, и ЛСПМ, работающих по эффективной схеме ЗГ – ПФК – УМ. Они разработаны на основе нового поколения отпаянных АЭ серии «Кулон» малого (1-20 Вт) и «Кристалл» среднего (30-50 Вт) уровней мощности, созданных высокоэффективных и надежных ИП, высоковольтные модуляторы которых выполнены по схеме ёмкостного удвоения напряжения с магнитными звеньями сжатия наносекундных импульсов тока накачки, новых высокоселективных оптических систем по формированию однопучкового излучения дифракционного качества и методов управления мощностью излучения на основе свойств активной среды ЛПМ.

Большим достижением в этой области явилось создание совместно с ООО «НПП «ВЭЛИТ» промышленных ЛПМ с высокоскоростным управлением мощностью и ЧПИ излучения по любому заранее заданному алгоритму, включая пакетную и моноимпульсную модуляцию, от внешнего ПК. Для этого были разработан генератор формирования дополнительного маломощного импульса тока накачки и устройство быстрого перемещения этого импульса относительно основного импульса тока возбуждения. При размещении маломощного импульса тока в зоне прозрачности АС, т. е. перед основным импульсом тока, происходит заселение метастабильных уровней атомов меди и устанавливается в ЛПМ режим гашения генерации (Рис. 10,*а*). Если дополнительный импульс установлен в зоне поглощения АС, т. е. за основным импульсом, то возникает режим генерации (Рис. 10,*б*).

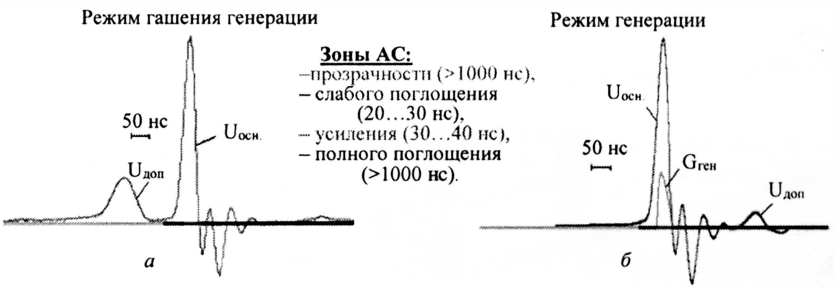
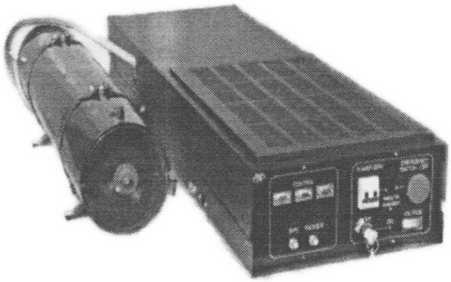


Рис. 10. Методы оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения в ЛПМ, работающего в режиме отдельного генератора. Осциллограммы основного ($U_{осн}$) и дополнительного ($U_{доп}$) импульсов напряжения накачки ЛПМ «Кулон 06» и генерации ($G_{ген}$). Патент РФ № 2251179

К этим лазерам относятся импульсный ЛПМ «Кулон 05» суммарной мощностью излучения 15 Вт и «Кулон 06» мощностью 20 Вт с ЧПИ 12-15 кГц, созданные на базе

отпаянных АЭ моделей ГЛ-206Д и ГЛ-206И и телескопического НР с увеличением $M = 200$. ЛПМ «Кулон 05» выполнен конструктивно в одном модуле и имеет воздушное охлаждение (Рис. 11,*а*), исполнение «Кулон 06» – двухмодульное: ИП с воздушным и излучатель с водяным охлаждением (Рис. 11,*б*). ЛПМ «Кулон 06» с мощностью

а



б

Рис. 11. Промышленные ЛПМ «Кулон 05» (*а*) и «Кулон 06 (*б*) с управляемой мощностью и ЧПИ излучения. Патенты РФ: № 2226022 и № 2251179

излучения в дифракционном пучке 6-8 Вт входит в состав созданных современных АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для изготовления прецизионных деталей ИЭТ толщиной 0,01-0,2 мм.

Разработана и исследована двухканальная ЛСПМ «Карелия» типа ЗГ – ПФК – УМ с синхронизацией каналов не хуже ±1 нс на базе двух отпаянных АЭ «Кристалл» ГЛ-205А мощностью излучения 30-40 Вт при ЧПИ 9-12 кГц (Рис. 12). С применением маломощного отпаянного АЭ «Кулон» ГЛ-204 (3 Вт) в ЗГ и двух мощных АЭ «Кристалл» ГЛ-205Б или ГЛ-205В в качестве УМ создана трехканальная ЛСПМ «Карелия-М» повышенной мощности (Рис. 13). С двумя АЭ ГЛ-205Б при ЧПИ 12,5 кГц мощность излучения ЛСПМ составила 70 Вт, с двумя АЭ ГЛ-205В при ЧПИ 10 кГц – 105 Вт.

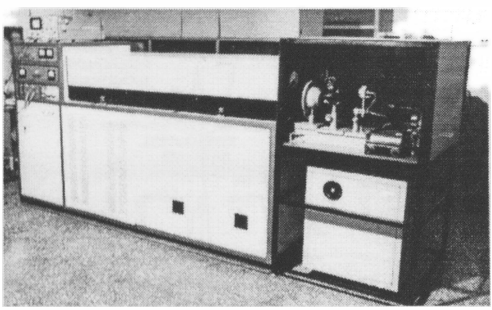


Рис. 12. Двухканальная ЛСПМ «Карелия»

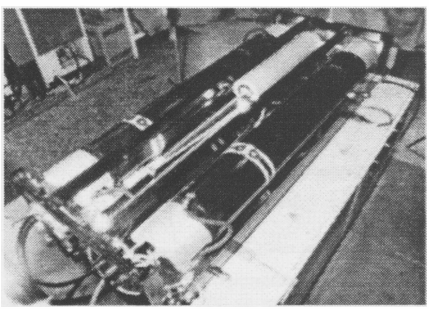


Рис. 13. Трехканальная ЛСПМ «Карелия-М

Оперативное управление мощностью и ЧПИ излучения в ЛСПМ по заданному алгоритму производится за счет высокоскоростной рассинхронизации оптического сигнала ЗГ из зоны поглощения активной среды УМ в зону его усиления или прозрачности и наоборот (Рис. 14).

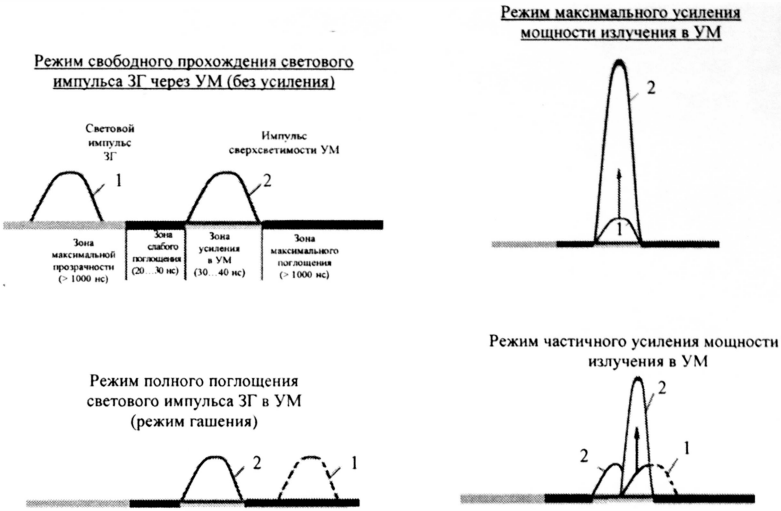


Рис. 14. Методы оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения в ЛСПМ, работающей по эффективной схеме ЗГ – УМ. Патент РФ № 2264011

Такая ЛСПМ «Кулон-10» мощностью излучения 10-15 Вт применяется в составе современной АЛТУ «Каравелла-1» для производительного изготовления прецизионных деталей ИЭТ толщиной 0,2-0,5 мм, ЛСПМ «Кулон-20» мощностью 20-25 Вт – в АЛТУ «Каравелла-1М» для изготовления деталей толщиной 0,5-1 мм.

Основными перспективными технологическими областями применения мощных ЛСПМ являются производительная микрообработка листовых материалов толщиной до 2 мм, разделение изотопов и получение чистых веществ для нужд ядерной энергетики.

В четвертой главе представлены результаты разработки и исследований современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) типа «Каравелла», созданных на базе промышленных импульсных ЛПМ и ЛСПМ и прецизионных столов: двухкоординатного горизонтального XY и вертикального Z с точностью позиционирования по осям ±2 мкм с управлением от ПК для прецизионной микрообработки металлических материалов, полупроводников и диэлектриков ИЭТ и, в частности, вакуумной и твердотельной СВЧ-техники.

Все основные результаты исследований и разработок, проведенных в рамках данной работы, по микрообработке (гл. 1), созданию промышленных отпаянных лазерных АЭ на парах меди «Кулон» (1-ая часть гл. 2), высокоселективных оптических систем по формированию однопучкового излучения дифракционного качества и со стабильными параметрами (2-ая часть гл. 2), методов оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения (3-ья часть гл. 2) и на их основе промышленных импульсных ЛПМ и ЛСПМ (гл. 3) стали основой для разработки серии современных технологических установок для микрообработки: АЛТУ «Каравелла-1», «Каравелла-1М», «Каравелла-2» и «Каравелла-2М». Внешний вид АЛТУ «Каравелла-1» и

МГТУ
им Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

«Каравелла-1М» представлены на рис. 15, «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» – рис. 16, их состав – рис. 17.

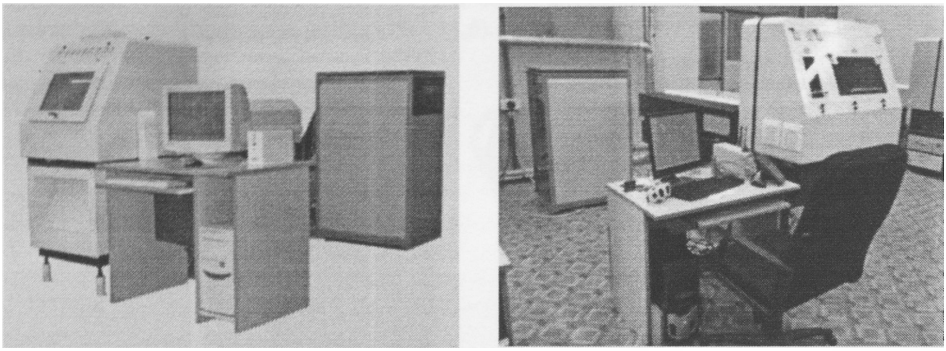


Рис. 15. Промышленные АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» на базе двухканальных ЛСПМ «Кулон-10» и «Кулон-20 для прецизионной микрообработки тонколистовых материалов ИЭТ толщиной 0,1-0,5 мм и 0,6-1 мм. Патенты РФ: № 2264011. № 2191452, № 35177, № 30468, № 20617 и № 2432652

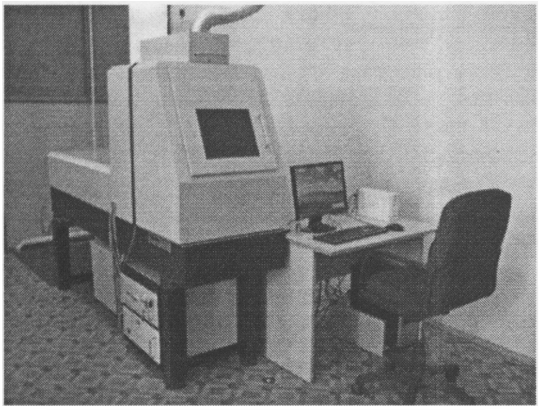


Рис. 16. Промышленные АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» на базе одноканального ЛПМ «Кулон-06» для прецизионной микрообработки фольговых материалов ИЭТ толщиной 0,01-0,2 мм. Патенты РФ: № 2226022, № 2251179, № 2191452, № 35177, № 30468 и № 20617

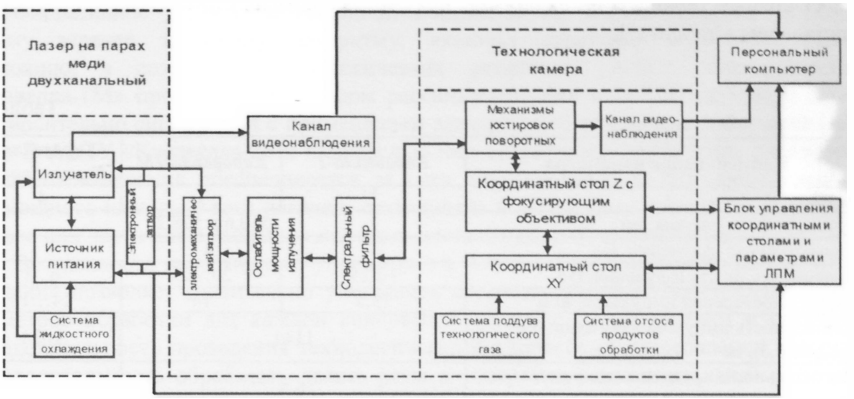


Рис. 17. Структурная схема промышленных АЛТУ «Каравелла»

Установка АЛТУ «Каравелла-1» разработана на базе двухканальной импульсной ЛСПМ «Кулон-10» со средней мощностью дифракционного пучка излучения 10-15 Вт, «Каравелла-1М» – «Кулон-20» мощностью 20-25 Вт и прецизионных координатных столов: горизонтального XY с рабочим полем 150x150 мм и вертикального Z с длиной перемещения 60 мм. Разогрев и возбуждение АЭ излучателя ЛСПМ производится двухканальным высоковольтным транзисторным ИП с точностью синхронизации каналов ±2 нс. Обрабатываемый объект устанавливается на XY-столе, фокусирующий ахроматический объектив – на Z-столе. АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» созданы на базе одноканального импульсного ЛПМ «Кулон-06» с мощностью излучения 6-8 Вт и горизонтального XY-стола с рабочим полем 100x100 мм и 200x200 мм соответственно. ЛПМ «Кулон-06» описан в главе 3.

Относительно сложная оптическая система АЛТУ предназначена для формирования однопучкового излучения дифракционного качества, его усиления и ослабления, транспортировки, видеонаблюдения и фокусировки на обрабатываемый объект в пятно диаметром 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^9-10^{12} Вт/см^2, достаточной для микрообработки в испарительном режиме. Для устранения влияния внешних вибраций, тепловой радиации и воздушно-тепловых потоков на стабильность оси диаграммы направленности пучка излучения и импульсной энергии все элементы оптической системы и координатные столы монтируются на массивном оптическом сотовом столе фирмы «Standa» (Литва) с пневмоизоляторами, расположенными между столом и его четырьмя опорами, высокотемпературные лазерные АЭ установлены в водоохлаждаемые теплосъемники с термодатчиком обратной связи, а поле между зеркалами нестабильных резонаторов герметично замкнуто.

Координатные столы XY и Z, созданные на базе линейных синхронных двигателей с оптическими датчиками положения, блок управления координатными столами, управляющий ПК с комплектом ПО «Laser» и система видеонаблюдения образуют систему движения и управления (СДУ) АЛТУ. СДУ предназначена для лазерной обработки по программе, реализуемой путем перемещений объекта и оптической колонны с одновременной коммутацией лазерного луча и необходимой коррекцией программных перемещений по ходу обработки.

Основные технические параметры созданных промышленных АЛТУ «Каравелла» представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Наименование параметра	***Каравелла-1***	***Каравелла-1М***	***Каравелла-2 Каравелла-2М***
1	2	3	4
Длины волн излучения, нм	510,6 и 578,2		
Диаметр пучка излучения, мм	14		
Средняя мощность излучения, Вт	10-15	20…25	6...8
Частота повторения импульсов, кГц	13,5	14	14…16
Длительность импульса излучения (по уровню 0,5), нс	11±1		10±1
Нестабильность средней мощности излучения в течение 8 часов, %	≤ 5		≤ 3
Импульсная энергия, мДж	0,1-1	0,5-1,5	0,2…0,5
Нестабильность импульсной энергии, %	≤ 5		≤ 3
Расходимость пучка излучения, мрад	0,1		
Нестабильность положения оси диаграммы направленности пучка излучения, мрад	10^{-3}-10^{-4}		
Фокусное расстояние объектива, мм	70-200	100-250	50…150
Диаметр рабочего пятна излучения, мкм	7…20	10...25	5…15
Плотность пиковой мощности, Вт/см^2	$4\cdot10^{10}$-$6\cdot10^{11}$	$3\cdot10^{9}$-10^{12}	$3\cdot(10^{10}$-$10^{11})$
Толщина обрабатываемых материалов, мм - металлические - полупроводники и диэлектрики	 0,05-0,5 до 1	 0,5-1,0 до 2	 0,001-0,2 до 0,5
Рабочее поле горизонтального двухкоординатного стола XY, мм	150x150		100x100 200x200
Длина перемещения вертикального координатного стола Z, мм	60		
Максимальная скорость перемещения координатного стола XY, мм/с	20		15
Погрешность позиционирования по каждой оси при (20±1) °С, мкм	±2		
Время готовности, мин	80		60
Время непрерывной работы, ч	Неограниченно		
Потребляемая мощность от трехфазной сети, кВт	≤ 5	≤ 6,5	≤ 3
Расход воды (система вода-вода), л/мин	≤ 10		4-6
Габаритные размеры, мм	2600x1700x1350	2600x2100x1650	2200x1700x183
Масса, кг	≤ 1150	≤ 1200	≤ 800
Гарантированная наработка, ч	> 1500		
Технический ресурс, лет	> 5		

Время выхода ЛПМ и ЛСПМ на установившийся тепловой режим составляет 60-80 мин. При такой потере времени в случае односменной работы АЛТУ «Каравелла» коэффициент загруженности составляет 0,83-0,85, в случае двухсменной – 0,92-0,94 и т. д., что является вполне приемлемым при непрерывном использовании технологического оборудования в серийном производстве.

Оперативное управление выходной мощностью и ЧПИ излучения, причем по любому заранее заданному алгоритму, включая пакетную и моноимпульсную модуляцию, в созданных технологических установках АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» производится методом рассинхронизации в ЛСПМ светового сигнала ЗГ относительно сигнала УМ с применением электронного ключа (см. 3-ью часть гл. 2 и гл. 3). В АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» оперативное управление параметрами выходного излучения обеспечивается за счет формирования в ИП дополнительного маломощного импульса тока накачки, создающего в АС импульсного ЛПМ условия для полного или частичного гашения генерации и максимальной генерации (см. гл. 3).

Возможность оперативного управления в АЛТУ «Каравелла» мощностью и ЧПИ излучения позволяет значительно уменьшить время на оптимизацию технологических параметров обработки для каждой конкретной детали с её материалом и определить последовательность проведения технологического процесса её изготовления, увеличить производительность обработки, делать резы и отверстия с минимальными размерами, минимальной шероховатостью и зоной термического воздействия.

Технологические установки АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М предназначены для производительной и качественной прецизионной микрообработки тонколистовых металлических материалов толщиной 0,3-0,5 мм и 0,6-1 мм и неметаллических до 1,5…2 мм, АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» – фольговых материалов толщиной 0,02-0,3 мм в производстве ИЭТ. В АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-2М» в конструкцию координатного стола XY дополнительно встроена моторизованная, программно управляемая, поворотная платформа (фирмы «Standa») с углом поворота на 360^0 для микрообработки деталей в полярных координатах. С данным устройством обеспечивается микрообработка деталей с цилиндрической поверхностью.

Глава 5 посвящена исследованию и разработке технологий качественной микрообработки фольговых (0,01-0,2 мм) и тонколистовых(0,3-1 мм) материалов ИЭТ на созданном, на базе импульсных ЛПМ и ЛСПМ, современном технологическом оборудовании АЛТУ «Каравелла» (гл.4). Технологии лазерной микрообработки разрабатывались практически одновременно с созданием АЛТУ «Каравелла» и внедрением в производство ИЭТ и, в частности, вакуумной и твердотельной СВЧ-техники.

На первом этапе исследований по микрообработке был проведен расчет пороговой плотности пиковой мощности испарения для большой группы металлических и неметаллических материалов, широко применяемых в современном производстве ИЭТ. К ним относятся высокотеплопроводные металлы: медь, алюминий, золото и серебро и тугоплавкие: молибден, вольфрам и тантал, никель, нержавеющая сталь, кремний, поликристаллический алмаз, сапфир, керамика и другие. Расчеты проводились по формуле (3), используемой во многих технологических работах, учитывающей основные теплофизические и оптические свойства материалов.

$$\rho_u = \frac{kT_u}{2A}\sqrt{\frac{\pi}{\delta\tau}}, \qquad (6)$$

где k – коэффициент теплопроводности, T_u – температура испарения (кипения), $A = 1\text{-}R$ – коэффициент поглощения (R – коэффициент отражения), δ – коэффициент температуропроводности, τ – длительность импульса лазерного излучения. Для импульсных ЛПМ, применяемых в АЛТУ «Каравелла», значение длительности импульсов для расчета по формуле (3) берется по полувысоте, т. к. импульс имеет

форму, близкую к треугольной, и равно 10^{-8} с. Все данные для расчета и расчетные данные по пороговой плотности испарения приведены в таблице 2.

С другой стороны, для реализации практических работ, необходимо знать реальные значения мощности излучения ЛПМ. Для этого дополнительно воспользовались уже формулой расчета плотности мощности импульсного излучения (7) для реальных режимов работы

$$\rho_и = \frac{P_{ср}}{f \cdot \tau \cdot S}, \qquad (7)$$

где $P_{ср}$ – средняя мощность лазерного излучения; f – частота повторения импульсов; τ – длительность импульсов излучения по полувысоте; $S = \pi \cdot d^2/4$ – площадь светового пятна сфокусированного лазерного пучка (d – диаметр светового пятна). Из формулы (7), зная $\rho_и$, определяется пороговая (минимальная) $P_{ср}$ ЛПМ, необходимая для микрообработки материала в испарительном режиме,

$$P_{ср} = \rho_и \, f \cdot \tau \, \pi \cdot d^2/4 \, . \qquad (8)$$

Таблица 2.

№ п/п	Материал	Темпер. испарения (кипения) ($T_и$), К	Коэфф. поглощения (A)	Коэффициент теплопроводности (k), Вт/(м·К)	Коэффициент температуропроводности (δ), см²/с	Порогоровая плотность мощности ($\rho_и$), 10^9 Вт/см²	Пороговая средняя мощность ЛПМ ($P_{ср}$), мВт при d=10 и 20 мкм	
Теплопроводные материалы								
1.	Cu	2840	0,368	401	1,17	0,25	30	120
2.	Au	3080	0,15	317	1,28	0,5	60	240
3.	Al	2792	0,086	236	0,938	0,7	80	320
4.	Ag	2485	0,045	429,5	1,74	1,6	190	750
Тугоплавкие материалы								
1.	Ta	5731	0,59	55,2	0,237	0,1	12	36
2.	Mo	4885	0,41	140	0,54	0,21	24	96
3.	W	5828	0,484	162,8	0,64	0,22	26	104
Нержавеющая сталь								
	Сталь	3000	0,5	32	0,035	0,09	11	43
Никель								
	Ni	3005	0,384	90,4	0,229	0,13	15	60
Кремний и искусственный поликристаллический алмаз								
1.	Si	3543	0,5	150	1,48	0,08	9	36
2.	Алмаз	4273	0,15	1600	7	1,5	180	720

В технологических установках АЛТУ «Каравелла» частота повторения импульсов составляет f = 14-15 кГц, используются ахроматические объективы с фокусным расстоянием F = 100, 150 и 200 мм, когда диаметр обрабатывающего светового пятна составляет d = 10, 15 и 20 мкм. В таблице 2 приведены пороговые средние мощности излучения ЛПМ для диаметров светового пятна 10 и 20 мкм (последний столбец). Из данной таблицы следует, что пороговые плотности пиковой мощности испарения и соответствующие им средние мощности излучения ЛПМ для теплопроводных и тугоплавких металлов имеют примерно одинаковый уровень и составляют (0,1-0,5)·10^9 Вт/см² и 10-60 мВт (d = 10 мкм). У меди, молибдена и вольфрама эти параметры

совпадают, что подтверждается экспериментально одинаковой скоростью обработки при равных значениях мощности излучения ЛПМ. Повышенным уровнем мощности испарения из этой группы материалов выделяются алюминий ($0{,}7\cdot10^9$ Вт/см^2), серебро ($1{,}6\cdot10^9$ Вт/см^2) и искусственный поликристаллический алмаз ($1{,}5\cdot10^9$ Вт/см^2), а пониженным – кремний ($0{,}8\cdot10^8$ Вт/см^2). Эти соотношения мощностей подтвердились при практической реализации микрообработки материалов.

Далее было показано, что при пороговых (минимальных) уровнях мощности испарения со стороны выхода лазерного луча на материале образуется застывший расплав металла. Последний свидетельствует об образовании в процессе лазерного воздействия большого количества жидкой фазы, стекающейся в его нижнюю часть, что не допустимо при изготовлении качественных прецизионных деталей. Это наглядно показано на примере сверления отверстий в нержавеющей стали методом прямой прошивки при пороговой плотности мощности испарения ~ 10^8 Вт/см^2 (Рис. 18). Но при

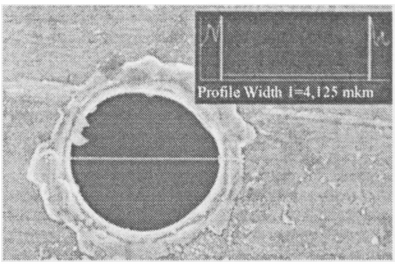
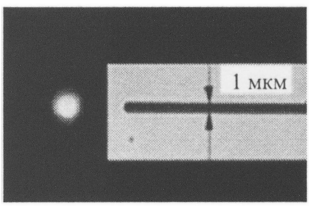
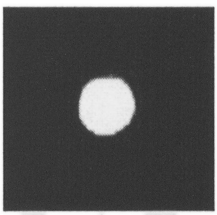


Рис. 18. Изображение отверстия в образце из нержавеющей стали толщиной 50 мкм, сформированного при воздействии излучения ЛПМ с $\rho_и \sim 10^8$ Вт/см^2. Увеличение x10^4, $F = 50$ мм

увеличении плотности пиковой мощности излучения более чем на порядок, что соответствует средней мощности излучения ЛПМ ≥ 1 Вт, отверстия становятся практически идеально чистыми и имеют субмикронную шероховатость (Рис. 19).



$F = 50$ мм, $d_{отв} = 3{,}18$ мкм
Увеличение x 3000



$F = 150$ мм, $d_{отв} = 15{,}5$ мкм
Увеличение x 1000

Рис. 19. Изображения отверстий в образцах из нержавеющей стали толщиной 50 мкм. Плотность пиковой мощности $\rho = (1\text{-}5)\cdot10^9$ Вт/см^2

В результате большого количества экспериментальных исследований установлено, что для обеспечения микрообработки металлических материалов в испарительном режиме с минимумом жидкой фазы и соответственно с высоким качеством необходимо иметь в обрабатывающем световом пятне диаметром 5-20 мкм плотность пиковой мощности на 1-2 порядка больше порогового уровня, т. е. $\rho = 10^{10}\text{-}10^{11}$ Вт/см^2. При обработке с таким уровнем плотности мощности фольговых материалов с толщиной, сопоставимой с шириной реза (10-50 мкм), разлетающиеся в результате микровзрывов из

зоны воздействия излучения пары и капли металла практически не встречают преград и полностью удаляются из этой зоны. При резке материалов с большей толщиной разлет паров металла происходит в основном между стенками уже образовавшегося разреза и возможно увеличение жидкой фазы и ухудшения качества микрообработки.

Также было показано, что как для теплопроводных, так и тугоплавких металлов при толщинах больше 1 мм время обработки резко возрастает, а скорость резко снижается и оказывается, что излучением ЛПМ выгодно обрабатывать материалы с толщиной менее 1 мм. И еще более выгодно применять ЛПМ при толщинах меньше 0,6 мм, когда время обработки составляет доли секунд, а скорость – единицы и десятки мм/с, что на порядок больше по сравнению с ЭЭО (Рис. 20).

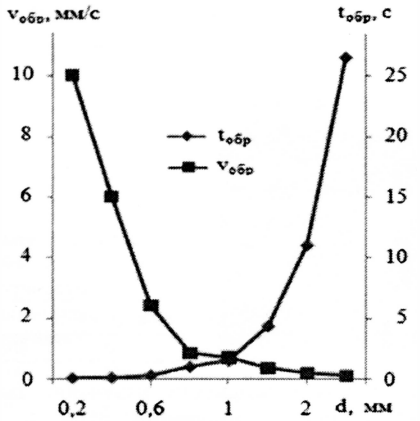
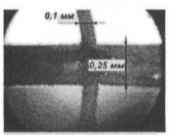


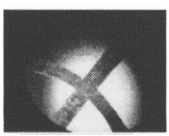
Рис. 20. Зависимости времени ($t_{обр}$) и скорости ($v_{обр}$) обработки для меди (молибдена) от толщины материала при сверлении отверстий импульсным излучением ЛПМ с диаметром сфокусированного пятна 15 мкм. $P_{ср} = 20$ Вт, $f = 8$ кГц, $\tau = 15$ нс и $\rho = 10^{11}$ Вт/см^2

С увеличением толщины обрабатываемого материала (>50…100 мкм) в зоне лазерного реза имеет место образование шлака и грата, наличие которых недопустимо в прецизионных деталях для ИЭТ. Для их удаления были разработаны способы химической обработки с наложением ультразвукового поля, которые позволили производить полную и эффективную очистку зоны лазерного реза как для теплопроводных (Cu, Al, Au, Ag), так и тугоплавких (Mo, W, Ta, Re) металлов, их сплавов и ряда других материалов, широко применяемых в ИЭТ. На рис. 21, на фрагментах молибденовой и медной деталей, показана последовательность и качество финишной химической очистки.

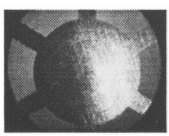
Лазерная обработка



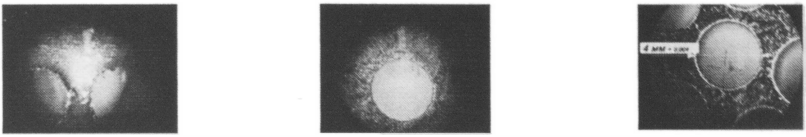
УЗ-обработка



Химобработка



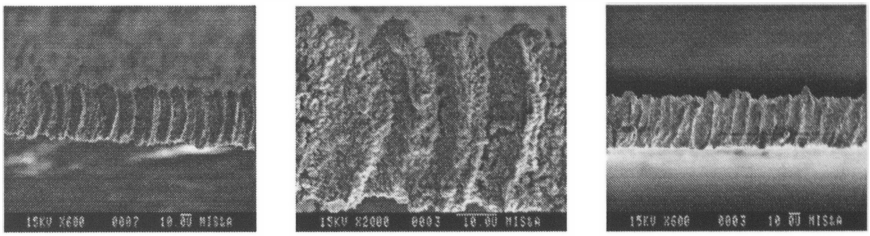
Фрагменты сферической сетки из Mo ≠ 0,07 мм



Фрагменты плоской диафрагмы из Cu ≠ 0,3 мм

Рис. 21. Этапы технологии изготовления прецизионных деталей при лазерной микрообработке

Экспериментально исследовано, с использованием растровой электронной микроскопии, влияние скорости, числа проходов и мощности излучения при обработке сфокусированным излучением с диаметром 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^{10}-10^{11} Вт/см^2 на качество поверхности реза, структуру и микротвердость ЗТВ материала. Все исследуемые объекты предварительно подвергались полной химической очистке. Лазерная резка материалов проводилась с фокусным расстоянием ахроматического объектива 100 и 150 мм при средней мощности излучения 1-10 Вт, скорости обработки V = 1-8 мм/с и числу проходов 1-120. Примеры исследований представлены на рис. 22-24.



а) V = 3 мм/с, n = 1 б) V = 7 мм/с, n = 3

Рис. 22. Изображение поверхности реза тантала толщиной 0,03 мм при увеличениях а) х600 и х2000 и б) х600. $P_{изл}$ = 1,5 Вт; V – скорость обработки, n – число проходов

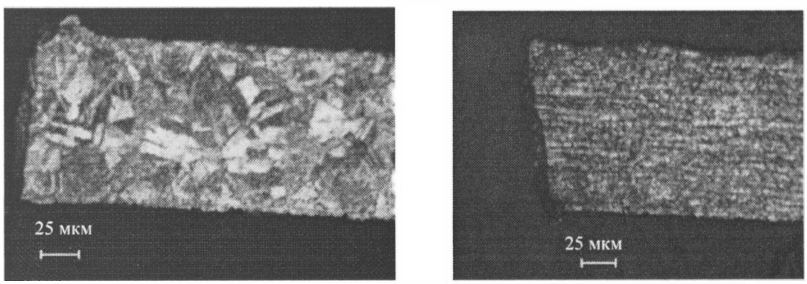
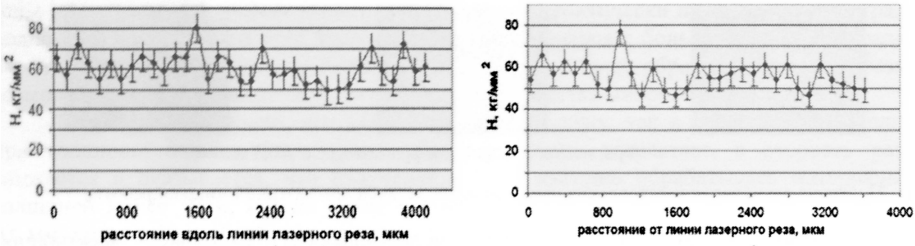


Рис. 23. Микроструктура сплава БрБ2 (0,1мм); V = 2мм/с; $P_{изл}$ = 2,4 Вт; n =6 и молибдена (0,1мм); V = 3мм/с; $P_{изл}$ = 2,4; n=8



$H_{ср}$ = 61 кг/мм² (598 МПа) $H_{ср}$ = 56 кг/мм² (549 МПа)

а б

Рис. 24. Изменение микротвердости образца меди МВ толщиной 0,1 мм вдоль (*а*) и в перпендикулярном направлении (*б*) от линии лазерного реза. $P_{изл}$ = 2,4 Вт, $V_{реза}$ = 6 мм/с, n = 3

Для молибдена толщиной 0,1, 0,15 и 0,2 мм наблюдается небольшое повышение твердости в зоне, прилегающей к поверхности реза, свидетельствующее о незначительном упрочнении зоны реза.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено:

– поверхность лазерного реза имеет многоканальную структуру с периодом повторения каналов 10-15 мкм и глубиной (шероховатостью) до 3-4 мкм;

– повышение скорости и числа проходов обработки приводит к уменьшению шероховатости поверхности реза до значений менее 1 мкм;

– структурных изменений в прилегающей к лазерному резу зоне (10-20 мкм) не обнаружено и она аналогична центральной зоне материала;

– в высокотеплопроводных металлах упрочнения или разупрочнения материала в прилегающей к лазерному резу зоне (10-20 мкм) не происходит;

– в тугоплавких металлах со значительно более низкой теплопроводностью в прилегающей к лазерному резу зоне (10-20 мкм) происходит незначительное упрочнение.

В главе 6 показано применение промышленного технологического оборудования АЛТУ «Каравелла-1», «Каравелла-1М», «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для изготовления прецизионных деталей ИЭТ. Основой для использования АЛТУ в производстве ИЭТ стали положительные результаты исследований и разработок технологий микрообработки фольговых (0,01-0,2 мм) и тонколистовых (0,3-1 мм) материалов импульсным излучением ЛПМ (см. гл. 5). Для оценки качества и точности микрообработки использовались измерительный оптический микроскоп модели VMM200 фирмы UHL, проекционный микроскоп PV5100 фирмы Mitutoyo и микроскоп Leica фирмы Carl Zeiss.

Изготовление прецизионных деталей на АЛТУ «Каравелла» производится при оптимизированных технологических параметрах обработки и в соответствии с программой на рабочие чертежи, заданной в конструкторском пакете AutoCAD. К этим параметрам относятся фокусное расстояние объектива (F = 50-200 мм), мощность излучения при ЧПИ 14-15 кГц ($P_{изл}$ = 0,4-10 Вт; $\rho = 10^9$-10^{11} Вт/см²), скорость резки (V = 0,5-10 мм/с) и число проходов (n = 1-40), время выдержки в рабочей точке (при сверлении). Ширина реза обрабатываемого материала при оптимизированных параметрах составляет 10-30 мкм, шероховатость поверхности не превышает 1...2 мкм, ЗТВ – 5…10 мкм. Максимально высокое качество, минимальные размеры реза и отверстий достигаются в одноволновом режиме работы ЛПМ (на λ = 510,6 нм), но при этом производительность обработки из-за уменьшения мощности падает в 1,5…2 раза. На установках эффективно обрабатываются как тугоплавкие (Mo, W, Ta, Re), так и высокотеплопроводные (Cu, Al, Ag, Au) и другие металлы (Ni, Ti, Zr,

Fe, Pb, Zr), их сплавы, большой круг полупроводников и диэлектриков (Si, Ge, GaAs, Al_2O_3, 22ХС, сапфир, искусственный алмаз, стекло, кварц), графит, композиционные материалы.

В настоящее время на АЛТУ «Каравелла», в обеспечении НИОКР, единичных, мелкосерийных и серийных поставок приборов СВЧ-техники и других ИЭТ, в «ОАО «НПП» «Исток» изготавливаются десятки и сотни типов плоских и объемных прецизионных металлических деталей простой и сложной конфигураций со скоростью обработки 0,5-5 мм/с: диафрагмы, сетки, аноды, электроды, планки, чашки, экраны, контакты, лепестки, измерительные зонды и т. д. толщиной 0,01-1 мм, а также производится раскрой различных припоев толщиной 20-50 мкм со скоростью до 15 мм/с. С максимальной производительностью (5-15 мм/с) вырезаются диски, окна и ЧИПы из искусственного поликристаллического алмаза и кремния толщиной до 1,5…2 мм и производится чистка поверхности керамических пластин.

В результате многолетней практической эксплуатации АЛТУ было показано, что лазерный способ микрообработки импульсным излучением ЛПМ с наносекундной длительностью имеет ряд существенных преимуществ перед известными традиционными способами изготовления прецизионных деталей, включая и ЭЭО, особенно сложных конфигураций: широкая номенклатура обрабатываемых конструкционных материалов, уменьшение количества операций и переходов в несколько раз, экономия материалов при изготовлении и раскрое заготовки из листа, на порядок и более высокая производительность, высокая оперативность в обеспечение НИОКР, единичных и мелких поставок и серийном производстве, обработка без механического давления, эффективная обработка в атмосфере воздуха (без поддува технологического газа), точность изготовления деталей с допусками в пределах 4-6 мкм, малые шероховатость поверхности реза ($R_z \leq 1…2$ мкм) и зона термического влияния (ЗТВ$\leq$ 5…10 мкм), отсутствие расслоения и микротрещин металла (молибдена, вольфрама), высокий процент выхода годных деталей (до 100%), невысокая трудоемкость изготовления и универсальность технологической оснастки, наличие компьютерной базы данных на режимы лазерной микрообработки материалов, управление технологическими процессами от ПК, существенное снижение влияния человеческого фактора на воспроизводимость технологического процесса.

На самой мощной технологической установке «Каравелла-1М» (20-25 Вт) изготавливаются прецизионные детали с толщиной материала 0,6-1 мм (Рис. 25).

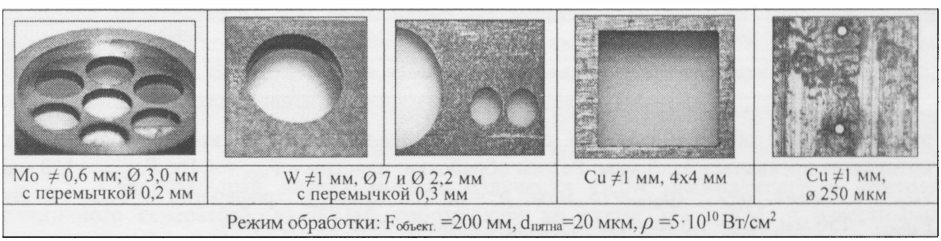


Рис. 25. Фрагменты плоских деталей

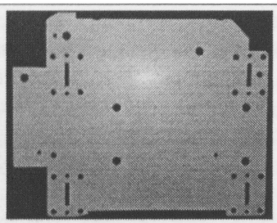
В таблице 3 представлены примеры и оптимизированные параметры режимов обработки объемных молибденовых деталей для СВЧ-приборов: пластины с осевой щелью и соосностью 10 мкм, диафрагмы с 21 отверстием и 200 мкм перемычками , цилиндрического стакана с 600 пазами и сферической сетки с радиально-кольцевыми пазами со 100 мкм перемычками. Изготовление цилиндрического стакана и сферической

сетки возможно лишь методом лазерной микрообработки. При этом толщина материала и требования к цилиндричности стенки реза определяют фокусное расстояние силового объектива, обеспечивающего соответствующую длину перетяжки.

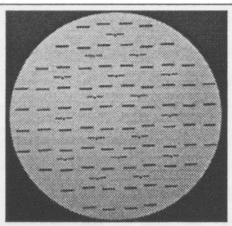
Таблица 3.

Параметры режима обработки	Каравелла-1	Каравелла-1М	Каравелла-2	Каравелла-2М
Толщина, мм	0,2	0,45	0,16	0,07
Мощность излучения, Вт	4,8	8,2	6	2,4
Фокусное расстояние, мм	150	150	100	100
Скорость обработки, мм/с	1,5	3,5	5	1,3
Число проходов	11	22	8	7
Время изготовления, мин	7,5	45	150	15

На АЛТУ «Каравелле-2М» изготавливаются прецизионные пластины прямоугольной и круглой конфигураций с размерами соответственно 122,5x98,1 мм и 163,5 мм из константана (МН-45) и стали (8ЮПВ-В-1) для антенных систем (Рис. 26) и трафареты размером 105x94 мм из бериллиевой бронзы (БрБ2) для заполнения отверстий межслойных соединений проводниковой пастой в производстве многослойных керамических плат (Рис. 27). Кроме высокого качества обработки и выигрыша во времени,

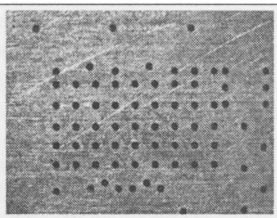


МН-45 ≠0,2 мм



8ЮПВ-В-1≠0,2 мм

Рис. 26. Пластины из константана и стали для антенных систем



БрБ2 ≠0,05 мм

Рис. 27. Фрагмент трафарета

эта технология обеспечивает для отверстий и щелей высокую взаимную соосность, которая не превышает 3…5 мкм. Режим обработки: пластин – $P_{изл.}$ = 4 Вт, $F_{объект.}$ =150 мм, $v_{обр.}$= 4,5 мм/с, n=22, ($d_{пятна}$=15 мкм, ρ =1,5·10^{10} Вт/см^2); трафаретов – $P_{изл.}$ = 2 Вт, $F_{объект.}$ =150 мм, $v_{обр.}$= 1,5 мм/с, n=4, ($d_{пятна}$=15 мкм, ρ =0,8·10^{10} Вт/см^2).

При малых уровнях мощности весьма эффективной оказалась микрообработка по формированию топологии проводник-зазор с размерами 20-100 мкм для многослойных керамических плат с серебряным покрытием (≤10 мкм) (Рис. 28 и 29). Режим обработки: $P_{изл.}$ = 0,3 Вт, $F_{объект.}$ =100 мм, λ = 0,51 мкм, $v_{обр.}$= 1 мм/с, n=3, ($d_{пятна}$=10 мкм, ρ =2,5·10^9 Вт/см^2).

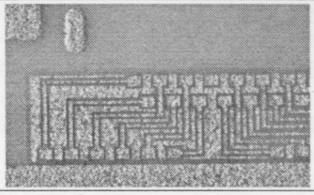
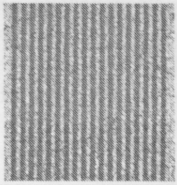


Рис. 28. Изображение топологии проводник/зазор с размерами в пределах 20-100 мкм



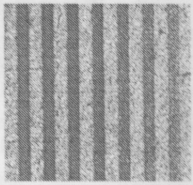


Рис. 29. Изображение фрагментов топологии проводник/зазор с размерами 40/40 и 100/100 мкм

На рис. 30-35 показаны дополнительные возможности применения АЛТУ «Каравелла» в производстве ИЭТ.

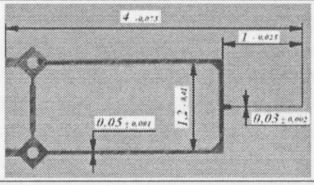


Рис. 30. Катод из сплава W-Re толщиной 50 мкм

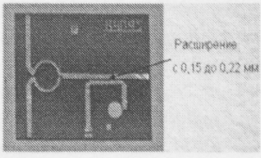


Рис. 31. Корректировка топологии полоснопропускных фильтров

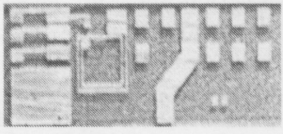


Рис. 32. Раскрой сапфировых подложек на ЧИПы для производства МИС (≠0,3 мм)

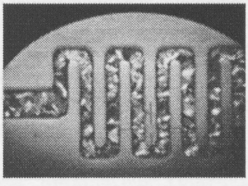


Рис. 33. Меандра с шагом 100 мкм из искусственного алмаза (≠ 0,2 мм)

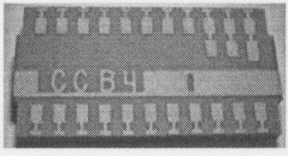


Рис. 34. Чистка поверхности керамических пластин (22ХС)

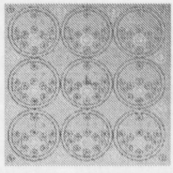


Рис. 35. Раскрой припоя (≠50-150 мкм)

В результате проведенной работы показано, что созданные промышленные АЛТУ «Каравелла» на базе импульсных ЛПМ и ЛСПМ и прецизионных координатных столов наиболее перспективны для применения по восьми направлениям микрообработки материалов ИЭТ: контурная прецизионная резка, сверление микроотверстий методом прямой прошивки, скрайбирование, раскрой припоев, обработка пленочных покрытий, поверхностная чистка деталей, маркировка и гравировка с высоким разрешением.

Основные выводы и результаты

1. Сравнительный анализ свойств излучения ЛПМ, работающего в режиме единичного генератора, и ЛСПМ, работающей по схеме ЗГ – УМ, с известными технологическими лазерами показал, что ЛПМ и ЛСПМ с длинами волн излучения 510,6 и 578,2 нм, короткой длительностью импульсов (20-40 нс), высокими частотами повторения импульсов (5-30 кГц) и низкой импульсной энергией (0,1-10 мДж) остаются на сегодня самыми мощными импульсными источниками когерентного излучения в видимой области спектра и являются идеальными световыми инструментами диаметром 5-20 мкм для эффективной микрообработки материалов ИЭТ.

2. Разработано и исследовано на основе комплекса научно-технических, технологических и схемных решений новое поколение промышленных с высокими эффективностью, надежностью и качеством излучения отпаянных лазерных АЭ на парах меди, ЛПМ и ЛСПМ со средней мощностью излучения 1-20 Вт и 30-100 Вт, превосходящих зарубежные аналоги по съему мощности излучения с единицы АС в 2-4 раза и минимальной наработке в 4-5 раз.

3. Исследованы закономерности динамики формирования излучения импульсного ЛПМ при работе в режиме генератора с оптическими резонаторами. Впервые показано, что выходное излучение ЛПМ имеет многопучковую структуру: 2 пучка сверхсветимости и 2-4 пучка, сформированных непосредственно резонатором, количество которых определяется временем существования инверсии населенностей в активной среде (20-40 нс). Причем каждый пучок обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками, что неприемлемо для микрообработки.

4. Установлено, что для эффективной микрообработки материалов в испарительном режиме импульсным излучением ЛПМ необходимо формирование однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и плотностью пиковой мощности 10^9-10^{12} Вт/см^2 в сфокусированном световом пятне диаметром 5-20 мкм.

Такое качество излучения достигается при использовании в ЛПМ и ЛСПМ новых оптических режимов работы с неустойчивым резонатором: с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическим в сочетании с пространственным фильтром-коллиматором.

5. Исследованы физические свойства активной среды импульсного ЛПМ и впервые установлено, что в отношении к собственному излучению активная среда имеет четыре, последовательно идущие друг за другом и повторяющиеся от импульса к импульсу, характерные временные зоны: слабого поглощения ($\tau = 20\ldots30$ нс), усиления ($\tau = 30\ldots40$ нс), полного поглощения ($\tau > 1000$ нс) и максимальной прозрачности ($\tau > 1000$ нс). На основании этого созданы методы и устройства для автоматизированного управления режимами лазерной микрообработки посредством изменения инверсии населенностей АС.

6. Показано, что излучением ЛПМ эффективно обрабатывать материалы с толщиной менее 1 мм. И еще более эффективно применять ЛПМ при толщинах меньше 0,6 мм, когда время обработки составляет доли секунд, а скорость – единицы и десятки мм/с, что на порядок больше по сравнению с ЭЭО.

7. Исследовано качество поверхности лазерного реза и структура ЗТВ для высокотеплопроводных и тугоплавких материалов при обработке импульсным излучением ЛПМ с диаметром светового пятна 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^{10}-10^{11} Вт/см^2 и установлено:

– поверхность лазерного реза имеет многоканальную структуру с периодом повторения каналов 10-15 мкм и глубиной (шероховатостью) до 3-4 мкм;

– повышение скорости и числа проходов обработки приводит к уменьшению шероховатости поверхности реза до значений менее 1 мкм;

– в высокотеплопроводных металлах упрочнения или разупрочнения материала в прилегающей к лазерному резу зоне (10-20 мкм) не происходит;

– в тугоплавких металлах с более низкой теплопроводностью, в прилегающей к лазерному резу зоне (10-20 мкм), происходит незначительное упрочнение.

8. Созданы современные АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» с диаметром обрабатывающего светового пятна 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^9-10^{12} Вт/см^2 при ЧПИ 14 кГц для производительной и качественной прецизионной

микрообработки тонколистовых материалов ИЭТ толщиной 0,3-0,5 мм и 0,6-1 мм. В АЛТУ применены промышленные ЛСПМ «Кулон-10» со средней мощностью излучения 10-15 Вт и «Кулон-20» мощностью 20-25 Вт, новые высокоселективные оптические системы и методы управления параметрами излучения и прецизионный трехкоординатный стол XYZ с рабочим полем горизонтального стола XY 150x150 мм и точностью позиционирования по осям ± 2 мкм.

9. Созданы АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» с диаметром обрабатывающего светового пятна 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^{9}-10^{11} Вт/см^2 при ЧПИ 15 кГц, для производительной и качественной прецизионной микрообработки фольговых материалов ИЭТ толщиной 0,01-0,2 мм. В АЛТУ применены промышленный ЛПМ «Кулон-06» со средней мощностью излучения 5-8 Вт, новые высокоселективная оптическая система и методы управления параметрами излучения и прецизионный трехкоординатный стол XYZ с рабочим полем горизонтального стола XY 100x100 мм и 200x200 мм и точностью позиционирования по осям ± 2 мкм.

10. Показано, что излучением ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов с высокой производительностью и качеством обрабатываются как высокотеплопроводные (Cu, Al, Ag, Au), так и тугоплавкие (Mo, W, Ta, Re) и другие (Ni, Ti, Zr, Fe, Pb) металлы, их сплавы, большой круг полупроводников и диэлектриков (Si, Ge, GaAs, Al_2O_3, 22ХС, сапфир, искусственный алмаза, стекло, кварц), графит и композиционные материалы толщиной 0,01-1 мм.

11. Лазерный способ микрообработки излучением ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов имеет ряд существенных преимуществ перед известными традиционными способами изготовления прецизионных деталей, включая и ЭОО, особенно деталей сложных конфигураций:

– широкая номенклатура обрабатываемых конструкционных материалов, обработка без механического давления, эффективная обработка в атмосфере воздуха (без поддува технологического газа), экономия материалов при изготовлении и раскрое заготовки из листа, невысокая трудоемкость изготовления и универсальность технологической оснастки;

– на порядок и более высокая производительность, уменьшение количества операций и переходов в несколько раз, высокая оперативность в обеспечение НИОКР, в единичном, мелком и серийном производствах;

– малые шероховатость поверхности реза (≤ 1…2 мкм) и зона термического влияния (≤ 5…10 мкм), отсутствие расслоения и микротрещин металла (молибдена, вольфрама);

– наличие компьютерной базы данных на режимы лазерной микрообработки материалов, управление технологическими процессами от ПК, существенное снижение влияния человеческого фактора на воспроизводимость технологического процесса, высокий процент выхода годных деталей (до 100%).

12. Установлено восемь перспективных технологических направлений по лазерной микрообработке материалов ИЭТ импульсным наносекундным излучением ЛПМ: контурная прецизионная резка, сверление микроотверстий методом прямой прошивки, скрайбирование, раскрой припоев, обработка пленочных покрытий, поверхностная чистка деталей, формирование изображений в объеме прозрачных сред, маркировка и гравировка с высоким разрешением.

Новизна технических решений подтверждена 12 патентами РФ и 1 авторским свидетельством СССР.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Монографии

1. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 312 с.

Статьи в периодических журналах перечня ВАК РФ

1. Исследование лазера на парах меди с большим ресурсом и улучшенными параметрами импульса возбуждения / Н.А. Лябин [и др.] // Квантовая электроника. 1983. Т. 10, № 9. С. 1908-1910.

2. Пространственные, временные и энергетические характеристики излучения лазера на парах меди / Н.А. Лябин [и др.] // Квантовая электроника. 1985. Т. 12, № 1. С. 74-79.

3. Лябин Н.А., Зубов В.В., Чурсин А.Д. Эффективная система генератор-усилитель на основе лазерных активных элементов на парах меди // Квантовая электроника. 1986. Т. 13, № 12. С. 2431-2436.

4. Лябин Н.А., Зубов В.В., Чурсин А.Д. Лазер на парах меди с высокостабильным однопучковым излучением и управляемой расходимостью // Квантовая электроника. 1988. Т. 15, № 10. С. 1947-1954.

5. Лябин Н.А. Безрезонаторный лазер на парах меди с высоким качеством излучения // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 4. С. 652-657.

6. Лябин Н.А., Зубов В.В., Чурсин А.Д. Активный элемент на парах меди для мощных лазерных систем типа генератор-усилитель // Квантовая электроника. 1990. Т. 17, № 1. С. 28-31.

7. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Доманов М.С. Отпаянные промышленные активные элементы лазеров на парах металлов мощностью от 1 до 50 Вт // Известия вузов, Физика. 1999. Т. 42, № 8. С. 67-73.

8. Лябин Н.А. Промышленные отпаянные лазеры на парах меди типа «Кристалл» с повышенными КПД и мощностью излучения // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 3. С. 258-264.

9. Разработка, производство и применение отпаянных лазеров на парах меди и золота / Н.А. Лябин [и др.] // Квантовая электроника. 2001. Т.31, № 3. С.191-202.

10. Промышленный лазер на базе отпаянных активных элементов серии KULON на парах меди (LT-10Cu), золота (LT-1,5Au), смеси паров золота и меди / Н.А. Лябин [и др.] // Прикладная физика. 2003. № 3. С. 84-89.

11. Лазеры на парах меди и их применение в технологии прецизионной обработки / Н.А. Лябин [и др.] // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. 2003. Вып. 2(482). С. 17-35.

12. Промышленные лазеры на парах металлов серии KULON / Н.А. Лябин [и др.] // Прикладная Физика. 2005. №1. С. 110-115.

13. Энергетические характиристики излучения саморазогревного промышленного лазера KULON-10 Cu-M / Н.А. Лябин [и др.] // Квантовая электроника. 2007. Т.37, №8. С.765-769.

14. Влияние уменьшения длительности фронта импульса напряжения на частоту следования импульсов генерации лазера на парах меди / Н.А. Лябин [и др.] // Квант. электроника, 2013, 43 (8), 715–719.

15. Обработка прозрачных диэлектрических материалов излучением лазера на парах меди / Н.А. Лябин [и др.] // Технология машиностроения. – 2005. № 10. – С. 60-64.

16. Состояние и перспективы развития автоматизированных лазерных технологических установок типа «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов изделий СВЧ-техники на ФГУП «НПП «Исток» / Н.А. Лябин [и др.] // Электронная техника. Сер. 1 СВЧ-техника. 2009. Вып. 2 (501). С. 45-52.

17. Лазеры на парах меди для прецизионной обработки изделий электронной техники / Н.А. Лябин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. 2013. Т. 129, № 7. С. 31-43.

18. Импульсные лазеры на парах меди, технологическое и медицинское оборудование на их основе / Н.А. Лябин [и др.] // Электронная техника. Сер. 1 СВЧ-техника. 2013. Вып. 3 (518). С. 211-220.

19. Исследование структуры и свойств зоны термического воздействия (ЗВТ) после лазерной обработки тонколистовых тугоплавких и теплопроводных материалов / Н.А. Лябин [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. М.: Машиностроение. 2013. № 8. С. 26-30.

20. Лазер на парах меди с однопучковым излучением дифракционного качества и его возможности для микрообработки материалов изделий электронной техники / Н.А. Лябин [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2014. – №. 8– С.30-62.

21. Лябин Н.А. Исследование импульсного лазер на парах меди с промышленными активными элементами серии «Кулон» в режиме с одним выпуклым зеркалом и его возможности для технологических применений // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.– 2014. – №. 6– С.1-15. DOI: 10.7463/0614.0717060.

22. Исследование свойств активной среды импульсного лазера на парах меди во времени и разработка на их основе методов оперативного управления параметрами выходного излучения / Н.А. Лябин [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.– 2014. – №. 7– С. DOI: 10.7463/0714.0717617.

23. Современные промышленные автоматизированные лазерные установки «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» для прецизионной микрообработки материалов изделий электронной техники/ Н.А. Лябин [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении – 2014. – №. 9– С.19-26.

24. Современные промышленные автоматизированные лазерные технологические установки «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для прецизионной микрообработки тонколистовых материалов ИЭТ / Н.А. Лябин [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении – 2014. – №. 10– С.41-48.

25. Применение технологии прецизионной лазерной микрообработки при макетировании и производстве многослойных керамических плат LTCC для изделий СВЧ-электроники / Н.А. Лябин [и др.] // Электронная техника. Сер. 1 СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 3 (522). – С. 15-22.

Патенты

1. А.с. 1438549 СССР, МКИ[4] Н 01 S 3/10. Импульсный безрезонаторный лазер / Лябин Н.А. – № 4211869/ 24-25; заявл. 19.03.1987.

2. Пат. 1565320 Российская Федерация. МКИ[5] Н 01 S 3/08. Импульсный лазер/ С.А. Плешанов, А.В. Армичев, А.Д. Чурсин, Н.А. Лябин; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – № 4423717/24-25; заявл. 13.05.1988.

3. Пат. 1813307А3 СССР, МКИ[5] Н 01 S 3/041. Лазер на парах металлов / Н.А. Лябин, В.В. Зубов, С.А Угольников; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – № 4861801/25; заявл. 24.08.1990.

4. Пат. на полезную модель 20617 Российская Федерация, МКИ^{7}Н 01 S 3/00, В23К26/00. Импульсный лазер на парах металлов / Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин, М.Е Королева; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – № 2001111795/20; заявл. 03.05.2001; опубл. 10.11.2001, Бюл.№ 31.

5. Пат. 2191452 Российская Федерация, МКИ^7 Н 01 S 3/03, 3/227. Разрядная трубка лазера на парах металлов / Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – № 2000112859/28; заявл. 23.05.2000; опубл. 20.10.2002, Бюл. № 29.

6. Пат. на полезную модель 30468 Российская Федерация, МКИ^7 Н 01 S 3/03. Активный элемент лазера на парах металлов / Н.А. Лябин, В.С. Парамонов, И.С. Колоколов, А.Д. Чурсин; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – № 2002116609/20; заявл. 24.06.2002; опубл. 27.06.2003; Бюл.№ 18.

7. Пат. 35177 Российская Федерация. МКИ^7 Н 01 S 3/03. Разрядная трубка лазера на парах металлов/ Н.А. Лябин, М.Е. Королева, З.К. Ипполитова; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – № 2003119771/20; заявл. 01.07.2003; опубл. 27.12.2003; Бюл. № 36.

8. Пат. 2226022 Российская Федерация. МПК^7 Н 01 S 3/0975. Генератор наносекундных импульсов для возбуждения лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов / Н.М. Лепехин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов, Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин, И.С. Колоколов; заявители и патентообладатели авторы. – № 2002118259; заявл. 10.07.2002; опубл. 20.03.2004, Бюл.№ 8.

9. Пат. 2251179 Российская Федерация. МПК^7 Н 01 S 3/097.Способ возбуждения импульсных лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, работающих в режиме саморазогрева, и устройство для его осуществления./ Н.М. Лепехин, Ю.С. Присеко, В. Г. Филиппов, Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин; заявители и патентообладатели авторы. –№ 2003120867/28 заявл. 11.07.2003; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12.

10. Пат. 2264011 Российская Федерация. МПК^7 Н 01 S 3/02, 3/09. Способ возбуждения импульсов излучения лазерных систем на самоорганических переходах (варианты). / Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин, З.К. Ипполитова; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – № 2004108765/28; заявл. 24.03.2004.; опубл. 10.11.2005, Бюл. № 31.

11. Пат. 44004 Российская Федерация МКИ7 Н 01 S 3/097.Импульсный лазер./ Н.А. Лябин, З.К. Иполлитова, С.А Угольников; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – № 2004130171/22.; заявл.18.10.2004; опубл. 10.02.2005, Бюл. № 4.

12. Пат. 2288845 Российская Федерация МПК В44С 5/08 (2006.01), СО3С 23/00 (2006.01). Устройство формирования изображений с высоким разрешением внутри прозрачного или малопрозрачного твердого материала. / А.Г Григорьянц, И.А. Иванов, З.К. Ипполитова, Н.А. Лябин, И.Н. Шиганов.; заявители и патентообладатели авторы. – № 2005111797/12; заявл. 21.04.2005; опубл. 10.12.2006, Бюл. № 34.

13. Пат. 2432652 Российская Федерация, МПК Н 01 S 3/03, /05. Импульсный лазер / Н.А. Лябин, З.К. Иполлитова, А.Д. Чурсин, И.С. Колоколов; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». – №2010133034; заявл. 05.08.2010; опубл.27.10.2011, Бюл. № 30.

Подписано в печать: 30.12.2014
Объем: 2,1 усл. п.л.
Тираж: 100 экз. Заказ № 2063
Отпечатано в типографии «Реглет»
119526, г. Москва, Мясницкие Ворота д.1, стр. 3
(495) 971-22-77; www.reglet.ru