

На правах рукописи

Лябин Николай Александрович

Разработка и исследование промышленных отпаянных
лазеров на парах меди мощностью 10-50 Вт для
технологического и медицинского применений

Специальность: 05.03.01 – Технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



г.Москва, 2002.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие Исток».

Научный руководитель – д.ф.м.н. Казарян Мишик Айразатович

Официальные оппоненты –

д.т.н., профессор Шиганов И.Н.

к.ф.-м.н., с.н.с. Бучанов В.В.

1600058 Институт высоких температур РАН

Лябин Н.А.

Разработка и исследование
промышленных отпаянных
лазеров на парах меди
мощностью 10-50 Вт для те...
2002 0-00

диссертационная
техническая
Бауман

2002 2002 г. на заседании
в Московском государственном
а по адресу: 105005, Москва, 2-я

37.9.01		<i>2002</i>
31.01.01		<i>2002</i>

963.

одном экземпляре, заверенный

1600058

библиотек

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

2 г.

Васильев А.С.

Заказ № 85 Т

ИТТУ Н.Э.Баумана

Актуальность проблемы. Лазер на парах меди (ЛПМ) с длинами волн излучения 510,6 и 578.2 нм относится к одному из наиболее привлекательных и развивающихся классов газовых лазеров – к лазерам на самоограниченных переходах атомов металлов (ЛПМет). Они работают в импульсном режиме, генерируют с резонансного на метастабильные уровни. С момента получения первой генерации в ЛПМ прошло уже 36 лет (с 1966 г.). За это время усилиями целого ряда коллективов, прежде всего России (СССР) и США, были установлены основные физические принципы работы и принципы конструирования этих лазеров и основные области их применения. ЛПМ остается самым мощным источником когерентного излучения в видимой области спектра. К ЛПМ, из-за широких возможностей применения в науке, технике и медицине, поддерживается постоянный интерес.

ЛПМ в настоящее время находит применение для накачки перестраиваемых по длинам волн лазеров на растворах красителей (ЛРК) в мощных системах по разделению изотопов (AVLIS-технология) и получения особо чистых веществ, спектроскопических исследований, прецизионной [микро]обработки, как металлических, так и неметаллических тонколистовых материалов, с удваивающими частоту нелинейными кристаллами (НК) для микрообработки УФ-излучением и в УФ фотолитографии, в качестве усилителя яркости изображения, создания телевизионных проекционных систем на больших экранах, осаждения и травления пленок, в лидарных установках для зондирования атмосферы и морских глубин, в навигационных системах для проводки морских и посадки воздушных судов, высокоскоростной фотографии, подводной обработки, в криминалистике, голографии, шоу-индустрии и т.д., в таких разделах медицины, как дерматология и косметология, онкология, ангиопластика и др.

Широкие возможности ЛПМ определяются уникальным сочетанием параметров выходного излучения. Уникальность ЛПМ состоит в сочетании высокой частоты повторения импульсов (ЧПИ) (5-30 кГц) с относительно большой средней мощностью излучения (1-750 Вт) при КПД 0.5-2% на относительно коротких длинах волн (510.6 и 578.2 нм). Его отличает короткая длительность импульсов излучения (10-50 нс) и большие усиления (десятки и сотни Дб/м), относительно низкая импульсная энергия (0.1-100 мДж) и наоборот, высокая пиковая мощность (10-1000 кВт), расходимость близкая к дифракционной и дифракционная. При дифракционной и близкой к ней расходимостях в плоскости (пятне) фокусировки излучения достигаются предельно высокие плотности пиковой мощности (10^9 - 10^{14} Вт/см²), при которых достигается эффективная [микро]обработка практически любых материалов. Использование ЛПМ для накачки НК и ЛРК с коэффициентами преобразования 10-40% позволяет полностью перекрыть диапазон длин волн от ближней УФ до ближней ИК области спектра и, соответственно,

расширить функциональные возможности ЛПМ. Таким сочетанием параметров, как у ЛПМ, сегодня не обладает ни один коммерческий лазер. Близкий по спектру, мощности и КПД распространенный твердотельный лазер (ТТЛ) на основе иттрий-алюминиевого граната с неодимом (Nd:ИАГ) и удвоением частоты ($\lambda=1060 \text{ нм}; 2=530 \text{ нм}$) из-за тепловых искажений имеет относительно большие расходимости. И часто, для достижения эффекта прецизионной обработки, излучение Nd:ИАГ модулируется до ЧПИ ЛПМ. Эксимерные лазеры имеют более короткие длины волн излучения ($\lambda=193; 248; 308; 351 \text{ нм}$) и это их преимущество. Но ЧПИ обычно не более 0.5 кГц , что снижает производительность технологического процесса.

Но несмотря на уникальность параметров, объем продаж коммерческих ЛПМ занимает одно из последних мест и составляет, например, от объема ТТЛ не более 2% ($< 25 \text{ млн.долл.}$). (Коммерческими ЛПМет считаются лазеры мощностью излучения до 120 Вт, а наиболее популярными – до 40 Вт с КПД 0.5-1%). Такая ситуация сложилась, в основном, по двум причинам. Во-первых, в передовых зарубежных странах (США, Япония, Франция, Англия) основные усилия были направлены на разработку мощных ЛПМ для обеспечения программ типа AVLIS по лазерному разделению изотопов. Во-вторых, в России (СССР) проводились в основном широкомасштабные исследования ЛПМет во многих НИИ, а не промышленные разработки. Т.е. разработка коммерческих лазеров оставалась несколько в стороне.

Поэтому разработка популярных коммерческих ЛПМ с высокой надежностью и качеством излучения и воспроизводимыми параметрами считается сегодня крайне актуальной проблемой. Решение этой проблемы на высоком научно-техническом уровне связано с созданием долговечных эффективных активных элементов (АЭ) с рабочими температурами $1500\text{--}1700^\circ\text{C}$, необходимыми для обеспечения концентраций паров металла $10^{15}\text{--}10^{16} \text{ 1/см}^3$, надежных высоковольтных импульсных источников питания для формирования в АЭ импульсов тока с амплитудой сотни Ампер и выше и длительностью 50-200 нс и оптических систем для формирования пучков излучения с высоким качеством.

Цель работы. Исследование и разработка промышленных отпаянных саморазогревных АЭ на парах меди со средней мощностью излучения 10-50 Вт с высокими КПД и долговечностью и воспроизводимыми параметрами, исследование структуры выходного излучения и его пространственных, временных и энергетических характеристик и выбор оптических систем для формирования пучков излучения с высоким качеством, и создание на их основе излучателей, лазеров, технологических и медицинских установок.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели были использованы экспериментальные и теоретические методы исследования. Основные эксперименты проводились с использованием саморазогревных АЭ на парах меди «Кристалл» (ГЛ-201, ГЛ-201Д, ГЛ-205А, ГЛ-205Б и ГЛ-205В) с рабочей температурой $1500\text{--}1600^\circ\text{C}$. Разогрев и возбуждение АЭ

осуществлялось от импульсного высоковольтного тиратронного источника питания (ИП) с прямой схемой исполнения модулятора (типа ИП-18) и со схемой емкостного удвоения напряжения и магнитного звена сжатия импульсов тока. Формирование лазерных пучков излучения производилось с плоским и плоскосферическим резонаторами, неустойчивым резонатором (НР) телескопического типа и в режиме с одним зеркалом. Импульсы напряжения и тока на АЭ и излучения регистрировались соответственно с помощью делителя напряжения и трансформатора тока и фотоэлемента ФЭК-14К, подключенных к осциллографу типа С1-75 с наносекундным разрешением, температура разрядного канала – оптическим пирометром «Проминь», давление буферного газа – манометром ЭКВМ-1У. Потребляемая мощность от выпрямителя ИП измерялась с помощью киловольтметра и амперметра, выходная мощность излучения – преобразователем мощности лазерного излучения ТИ-3, подключенным к милливольтметру М-95 или М136, ЧПИ – частотомером ЧЗ-34А. Распределение интенсивности излучения в ближней и дальней зонах снималось с применением запоминающего осциллографа С7-8А. Исследование процесса формирования пространственной структуры излучения и расчет расходимости пучков проводились с использованием законов геометрической оптики (при расчете расходимости учитывался дифракционный предел).

Научная новизна заключается в следующих положениях:

- Генераторы паров меди (марки МВ или МоБ) на молибденовой (марки МЧВП) в ЛПМ обеспечивают максимальные КПД и мощность излучения после восстановления поверхности расплавленной меди и молибдена водородом при рабочей температуре разрядного канала $\sim 1600^\circ\text{C}$ (после цикла обезгаживания АЭ), когда происходит полное смачивание молибдена медью (увеличивается площадь и скорость испарения).
- Структура выходного излучения ЛПМ в режиме с одним зеркалом - двухпучковая (пучки сверхсветимости), с резонатором – многопучковая: два (всегда присутствующих) пучка сверхсветимости и несколько резонаторных пучков, количество которых (обычно 2 или 3) ограничено временем существования инверсии (20-40 нс). Каждый пучок обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками
- В режиме работы ЛПМ с одним выпуклым зеркалом, при радиусах зеркала на 2 порядка меньших расстояния от зеркала до выходной апертуры расходимость становится близкой к дифракционной ($\Theta=2-3\Theta_{\text{диф}}$). При этом в пятне фокусировки достигаются плотности пиковой мощности до 10^{11} - 10^{12} Вт/см², что на порядок больше, чем с плоским резонатором и на один-два порядка меньше, чем с НР телескопического типа. Нестабильности оси диаграммы направленности (ОДН) и

импульсной энергии по сравнению с НР минимальны, что обеспечивает высокую точность реза при прецизионной обработке.

- Применение в ЛПМ системы генератор-усилитель с пространственной селекцией излучения и системой наносекундной синхронизации каналов позволяет формировать выходной пучок с максимальной концентрацией энергии в пятне фокусировки (до 10^{12} - 10^{14} Вт/см²). При этом достигаются максимальные скорости [микро]обработки (при $t_{\text{выт}}=0.1-0.2$ мм, $V_{\text{обр}}=3-3.5$ мм/с), минимальные размеры отверстия и реза ($d_{\text{отв}}=5-30$ мкм с коэффициентом формы до 40), минимальная шероховатость поверхности реза (3-5 мкм).

Практическая ценность. Результаты работы были использованы при исследовании и разработке многих промышленных приборов: отпаянных саморазогревных АЭ “Кристалл-1” (ГЛ-201), “Квант” (УЛ-102) и “Кулон” (ГЛ-204); излучателя “Карелия-1” (ИЛГИ-201) и на его основе двухканального синхронизированного ЛПМ “Карелия”; АЛТУ “ЭМ-5029” (с ЛПМ “Карелия”) для скоростного изготовления фотошаблонов; АЛТУ “Каравелла” (с ЛПМ “Карелия”) для прецизионной обработки материалов изделий электронной техники (ИЭТ) (1987 г.); излучателя “Клен” (ИЛГИ-202) и на его основе ЛПМ “Курс” (ЛГИ-202, 1990 г.); медицинских установок “Янтарь-2Ф” (1991 г.) и “Яхрома-2” (1993 г.) на базе ЛПМ “Курс” и “Яхрома-Мед” (2001 г.), нового поколения отпаянных саморазогревных АЭ малой мощности (1-15 Вт) серии «Кулон» (ГЛ-206 А-Ж, 2000 г.) и средней (30-55 Вт) «Кристалл» (ГЛ-205 А-Г, 2000 г.), в мощных лазерных системах типа ЗГ-УМ в РНЦ «Курчатовский институт» (Москва), ЗАО «Алтек» (Москва), ИФП (г.Новосибирск), НПФ «Лад» (г.Химки) и для других применений в разных организациях.

Общий объем продаж АЭ серии “Кристалл” и “Кулон” с 1982 по 2002 годы (за 20 лет) составил около 1000 шт, а на их основе излучателей, лазеров и установок для разных применений около 100 шт.

Апробация работы.

- Лазеры на парах металлов и их применение: Российский семинар.- Новороссийск, п.Агой Туапсинского района, 27-30 сентября 1993 г.
- Лазеры на парах металлов и их применение: Российский симпозиум.- Новороссийск.-Абрау-Дюрсо, 22-25 сентября 1996 г.
- Физпром-96: Международная конференция.- п.Голицыно (М.о.), 22-26 сентября 1996 г.
- Лазеры в науке, технике, медицине: VIII Международная научно-техническая конференция.- Пушкинские Горы, 9-12 сентября 1997 г.,
- Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул: 3-я Международная конференция.- г.Томск, 22-26 сентября 1997 г.

- Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул: 2-ая Всероссийская научная конференция.- Звенигород, 29 сентября-3 октября 1997 г.
- Лазеры на парах металлов и их применение: Российский симпозиум.- Новороссийск.-Абрау-Дюрсо, 22-26 сентября 1998 г.
- Лазерные технологии и технологическое оборудование: Российский научно-технический семинар ЛАС.- Москва, 1 апреля 1999 г.
- Atomic and molecular pulsed lasers: The 4-th International conference.- Tomsk, September 13-17, 1999.
- Лазерные и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и положения: III Международная конференция.- Владимир-Суздаль-Шатура, 23-25 июня 2001 г.
- Лазеры в науке, технике, медицине: XII Международная конференция.- Сочи, 17-21 сентября 2001 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, литературы. Работа выполнена на 162 машинописных листах, содержит 66 рисунков, 14 таблиц, 165 наименований источников используемой литературы.

Работа выполнена при содействии к.т.н.Зубова В.В., которому автор выражает глубокую признательность. Автор благодарит весь коллектив лаборатории “Лазеры на парах металлов и их применение” и, в отдельности, ст.н.с.Чурсина А.Д. за помощь при проведении экспериментов и критическое обсуждение материалов исследований.

Содержание работы.

Во введении подчеркнуты широкие возможности практического применения импульсного ЛПМ в науке, технике и медицине, которые обусловлены уникальным сочетанием параметров выходного излучения, показана актуальность диссертационной работы и поставлены ее основные цели. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и перечислены результаты практической реализации работы.

Первая глава посвящена разработке и исследованию первого промышленного отпаянного саморазогревного АЭ “Кристалл-1”(ГЛ-201) на парах меди с мощностью излучения более 10 Вт. За основу конструкции АЭ ГЛ-201 взята конструкция саморазогревного АЭ с внутривакуумным расположением теплоизолятора, предложенная сотрудниками ФИАН СССР им.П.Н.Лебедева и НПО “Исток”. Анализ параметров и конструкции первого промышленного ЛПМ “Криостат-1” с отпаянным саморазогревным АЭ ТЛГ-5 показал, что АЭ обладает рядом существенных недостатков: малой мощностью излучения из-за низкой эффективности накачки; низким практическим КПД (0.15-0.25%) из-за высокой потребляемой мощности; гарантированной наработкой ≤ 200 часов из-за существенных недостатков конструкции ответственных узлов (разрядного канала, генераторов и конденсоров паров меди, электродных узлов, теплоизолятора и концевых

секций), несовершенством технологии тренировки и большой расходимости излучения из-за низкого качества выходных окон.

В активной среде импульсного ЛПМ максимальная генерация достигается при температурах разрядного канала около 1600°C ($n_{\text{Cu}}=10^{16}$ $1/\text{см}^3$), поэтому при создании АЭ с повышенной эффективностью (КПД и мощностью), надежностью (долговечностью и сохраняемостью), воспроизводимыми и стабильными параметрами к его отдельным элементам, узлам и конструкции в целом предъявляется комплекс повышенных требований. Анализ теплофизических и химических свойств тугоплавких металлов и керамики, выбор типа катода и их исследование в жестких условиях работы ЛПМ и отработка технологии по обезгаживанию привели к созданию отпаянного саморазогревного АЭ «Кристалл-1» (ГЛ-201) (диаметр и длина разрядного канала – 20 и 930 мм) со средней мощностью излучения более 10 Вт при практическом КПД $\sim 0.5\%$, гарантированной наработкой ≥ 500 часов и сохраняемостью > 5 лет (до 20 лет).

В результате экспериментальных исследований по оптимизации выходных параметров АЭ «Кристалл-1» с прямой схемой накачки установлено, что в диапазоне давлений буферного газа неона 100-760 мм рт.ст. и ЧПИ 3-18 кГц средняя мощность излучения составляет 10-18 Вт при практическом КПД 0.4-0.7%, что в 3 раза больше по сравнению с ТЛГ-5.

Вторая глава посвящена исследованию влияния условий накачки, давления буферного газа и конструкции генераторов паров меди АЭ на КПД и мощность излучения ЛПМ. Характеристики излучения ЛПМ исследованы с генераторами паров меди в танталовой оболочке с отверстиями, со свободным расположением меди на керамике, эльканайтами состава W-Cu и Mo-Cu и на молибденовой цилиндрической подложке с разными схемами исполнения импульсного высоковольтного модулятора накачки и давлениях неона в пределах 40-760 мм рт.ст.

Проведен анализ и экспериментальные исследования модуляторов накачки с прямой схемой исполнения, со схемой трансформаторного и емкостного удвоения напряжения и магнитными звеньями сжатия импульсов накачки с тиратронным коммутатором ТГИ1-2000/35 (и ТГИ1-2500/50) и ламповой схемой с коммутатором ГМИ-29А. Со схемой удвоения напряжения и магнитным звеном сжатия по сравнению с прямой схемой длительность импульсов разрядного тока укорачивается в два раза (с 250-300 нс до 120-150 нс), что приводит к двукратному увеличению мощности излучения и КПД за счет повышения оптимальной концентрации паров меди примерно в 2 раза (повышается $T_{\text{раб}}$ разрядного канала), увеличивается в 3-4 раза срок службы тиратрона (до 1000-1500 часов). Схема устойчиво работает при ЧПИ 3-11 кГц, амплитудах тока 0.2-1 кА и напряжениях 15-30 кВ и коммутирующих мощностях до 6-7 кВт. Схема с емкостным удвоением напряжения с точки зрения конструктивного исполнения компактнее и проще и имеет минимальные потери. Достоинством схемы с модуляторной лампой ГМИ-29А является возможность формирования импульсов накачки

длительностью 50-70 нс, соизмеримой с временем существования инверсии, что приводит к повышению мощности в 1.2-1.3 раза.

Экспериментально установлено, что генераторы паров меди (марки МВ или МоБ) на молибденовой цилиндрической подложке (марки МЧВП) в ЛПМ обеспечивают максимальные КПД и мощность излучения после восстановления поверхности расплавленной меди и молибдена водородом при рабочей температуре разрядного канала $\sim 1600^\circ\text{C}$ (после полного цикла обезгаживания АЭ), когда происходит полное смачивание молибдена медью (увеличивается площадь и скорость испарения). По сравнению с другими генераторами КПД и мощность излучения (особенно при «низких» давлениях 50-150 мм рт.ст.) возрастает до 1.5 раз. С увеличением давления неона от 40 до 760 мм рт.ст. в АЭ с молибденовыми генераторами мощность излучения монотонно убывает, в основном, из-за уменьшения мощности на $\lambda=0.51$ мкм (ухудшаются условия возбуждения). Мощность на $\lambda=0.58$ мкм слабо изменяется. Например, с АЭ ГЛ-201 с ЧПИ 10 кГц мощность излучения снижается с 34 до 20 Вт, практический (физический) КПД – с 1%(2%) до 0.67%(1.3%).

Экспериментальные исследования при давлениях, близких к атмосферному, и атмосферном показали, что для получения при этих давлениях значений мощности излучения, соизмеримых со значениями при низких давлениях, напряженность в газоразрядном промежутке АЭ должна быть не менее 30 кВ/м, когда формируются импульсы тока с длительностью фронта не более 50 нс ($\tau_{\text{осн}} \leq 150 \text{ нс}$) и скоростью нарастания более $4 \cdot 10^9$ А/с. Например, при атмосферном давлении, ЧПИ 9 кГц, и напряжении на АЭ ГЛ-201 ~ 28 кВ ($\tau_f \sim 50 \text{ нс}$ и $dI/dt \sim 4.2 \cdot 10^9$ А/с) мощность излучения составила 26 Вт, что лишь на 1 Вт меньше, чем при $p_{\text{не}}=250$ мм рт.ст.

Третья глава посвящена исследованию структуры выходного излучения ЛПМ и его пространственно-временных характеристик и их взаимосвязи с энергетическими параметрами. Для этого были разработаны экспериментальные установки и методики измерений. Проведен большой объем экспериментов по расшифровке структуры, характеристик и динамики формирования излучения в режиме сверхсветимости: без зеркал и с одним зеркалом и в режиме генератора: с плоским, плоскоферическим и неустойчивым телескопическим резонаторами.

Установлено, что структура выходного излучения ЛПМ в режиме сверхсветимости с одним зеркалом – двухпучковая: пучок (первый), сформированный суммарной геометрической апертурой разрядного канала АЭ из усиливающихся спонтанных «затравок» и пучок (второй), сформированный зеркалом и выходной апертурой канала, с резонатором – многопучковая: два (всегда присутствующих) пучка сверхсветимости и несколько (обычно 2 и 3) резонаторных пучков, количество которых ограничено временем существования инверсии (20-40 нс).

Экспериментальные исследования показали, что каждый пучок излучения ЛПМ характеризуется своими пространственными, временными и

энергетическими характеристиками: расходимостью, распределением интенсивности в ближней и дальней зонах, стабильностью оси диаграммы направленности (ОДН), длительностью, временем возникновения и исчезновения импульсов излучения, средней и пиковой мощностью, импульсной энергией. Характеристики пучков определяются типом оптического резонатора и параметрами его зеркал, геометрическим размером разрядного канала и зависят от условий возбуждения (фронта, общей длительности и амплитуды импульсов накачки, уровня потребляемой мощности), давления буферного газа и ЧПИ.

Пучки частично перекрываются в пространстве и во времени, конкурируя между собой по мощности в процессе формирования. В режиме с одним зеркалом импульс второго пучка сверхсветимости отстает от первого примерно на время одного двойного прохода излучением расстояния от разрядного канала (активной среды) до зеркала $\Delta t \sim 2\ell_0/c$, где ℓ_0 - расстояние от зеркала до активной среды, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. С резонатором второй пучок сверхсветимости отстает от первого также на $\Delta t = 2\ell_0/c$, но в этом случае ℓ_0 есть расстояние от активной среды до "глухого" зеркала резонатора. Первый резонаторный пучок отстает от второго пучка сверхсветимости на время одного двойного прохода излучением длины резонатора, второй на два двойных и т.д., т.е. на $\Delta t = (2L/c) \cdot n$, где L - длина резонатора, n - число двойных проходов. Каждый резонаторный пучок отстает от предыдущего на $\Delta t = 2L/c$.

С плоским и плоскосферическим резонаторами расходимость пучков на порядок и более остается больше дифракционного предела, что ограничивает их практическое применение.

Практическую ценность, особенно для технологических применений, например, прецизионной [микро]обработки, представляют узконаправленные пучки, формируемые телескопическим НР или одним выпуклым зеркалом.

При увеличениях телескопического НР $M = 100-300$ формируются пучки с расходимостью близкой к дифракционной и с дифракционной, и достижимы плотности пиковой мощности в пятне фокусировки (обработки) $10^{12}-10^{14}$ Вт/см³. Расходимости этих пучков можно с высокой точностью определить по формуле

$$\Theta = \frac{D_k}{(ML + \ell)M^{n-1}} + \frac{2.44\lambda}{D_k}, \quad (1)$$

где D_k - диаметр разрядного канала, M - увеличение резонатора, L - длина резонатора, ℓ - расстояние от «глухого» зеркала до выходной апертуры канала, n - число двойных проходов излучением длины резонатора, λ - длина волны излучения. С увеличением M и n расходимость пучков стремится к дифракционному пределу.

В режиме сверхсветимости с одним выпуклым зеркалом, при радиусах зеркала R на 2 порядка меньших расстояния ℓ от зеркала до выходной апертуры разрядного канала АЭ, расходимость качественного

пучка становится близкой к дифракционной ($\Theta=2-3\Theta_{\text{диф}}$) и определяется выражением

$$\Theta = \frac{RD_k}{2\epsilon^2} + \frac{2.44\lambda}{D_k} \quad (2)$$

При этом в пятне фокусировки достигаются плотности пиковой мощности 10^{11} - 10^{12} Вт/см², что на порядок больше, чем с плоским резонатором и на 1-2 порядка меньше, чем с телескопическим НР. Нестабильность ОДН и импульсной энергии по сравнению с НР минимальны (~ 0.01 мрад и $\sim 1.5\%$), что обеспечивает высокое качество реза при прецизионной обработке.

Исследована и реализована оптическая система, позволяющая в несколько раз увеличить КПД и мощность качественного пучка ЛПМ в режиме с одним выпуклым зеркалом при расходимостях близких к дифракционному пределу.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию нового поколения высокоэффективных промышленных отпаянных саморазогревных АЭ на парах меди со средней мощностью излучения 30–55 Вт (серия «Кристалл»).

Создание конструкции нового поколения АЭ стало возможным в результате тщательного анализа материалов и элементов конструкции и технологических процессов изготовления АЭ «ГЛ-201», ответственных за ограничение его КПД, мощности и долговечности, выбора новых материалов и исследования их свойств, применения эффективных генераторов паров меди и исследований пространственных, временных и энергетических характеристик многопучкового излучения ЛПМ. Поверхности окон АЭ покрыты просветляющей плёнкой с $\tau = 98-99\%$, устойчивой к ультрафиолетовому излучению. Окна установлены под углом $78 \pm 1^\circ$ и посажены на клей с $T_{\text{раб}} = 200^\circ\text{C}$, что полностью устраняет их влияние на структуру выходного излучения. Экспериментальные исследования и расчёты показали, что угол наклона оптических окон (для устранения обратной «паразитной» связи с активной средой) не должен быть больше

$$\alpha \leq \arctg \frac{(2 - ab)}{(2a + b)}, \quad (3)$$

где $a = d/S$ (d и S – длина и диаметр разрядного канала), $b = d/L$ (L – расстояние от конца разрядного канала до окна по оптической оси).

Исследования выходных характеристик излучения АЭ «Кристалл» проводились при разных типах резонаторов, разных давлениях неона, добавок водорода и ЧПИ. Установлено, что в диапазоне ЧПИ 5-20,5 кГц, при оптимизации условий накачки, мощность излучения изменяется незначительно, в пределах 15%. При увеличении давления неона от 50 до 760 мм рт.ст. мощность снижается на 35-50%. Чем меньше диаметр и длина разрядного канала, тем меньше относительное снижение мощности.

Параметры промышленных АЭ нового поколения «Кристалл» представлены в табл.1. Они выбирались путём компромиссного решения между КПД, мощностью и долговечностью. Гарантированная наработка АЭ «Кристалл LT-30Cu», LT-40Cu», LT-50Cu» >1000 часов (получены положительные результаты испытаний на 2000 часов и более).

Таблица 1.

Наименование параметров	«КРИСТАЛЛ»			
	LT-30Cu ГЛ- 201А*	LT-40Cu ГЛ-205Б*	LT-50Cu ГЛ-205В*	LT-4Au ГЛ- 205Г*
1	2	3	4	5
Лазерная среда	Пары меди			Пары золота
Длина волны излучения, нм	510.6/578.2			627.8
Давление буферного газа Ne, мм рт.ст.	250	180	150	200
Диаметр разрядного канала, мм	20	20	32	20
Длина разрядного канала, мм	930	1230	1230	930
Объем активной среды, см ³	250	350	900	250
Частота повторения импульсов, кГц	10-12	10-12	10-12	14-17
- Оптимальная	8-20	8-20	8-20	10-20
- Рабочий диапазон				
Средняя мощность излучения (при оптимальной частоте), Вт:				
- Режим генератора **	30-35***	40-45***	50-55 ***	4-6
- Режим усилителя **	40-45	55-60	70-75	-
Расходимость излучения излучения с плоским резонатором, мрад	4	3	5	4
Расходимость излучения с телескопическим НР, мрад	50-70% от мощности с плоским резонатором, в пределах 0.2-0.5 мрад			
Мощность, потребляемая от выпр., кВт	2.9-3.1	3.6-3.8	4.5-4.7	3.3-3.5
Время готовности (при номин. потр. мощности), мин	60	60	80	60
Гарантируемая (минимальная.) наработка, ч	1000	1000	1000	500

- * - обозначение АЭ по ТУ;
- ** - питание от тиратронного модулятора со схемой емкостного удвоения напряжения и магнитным звеном сжатия импульсов тока
- *** - значение максимальной средней мощности излучения соответствует АЭ с просветленными окнами ($\tau=98-99\%$).

Для АЭ серии «Кристалл» важными являются параметры в режиме усилителя мощности (УМ), так как они, в основном, применяются в мощных системах типа ЗГ-УМ для технологических применений. Мощность излучения, практический и физический КПД АЭ «Кристалл LT-30Cu» в режиме УМ составляет ~ 45 Вт, ~ 1,5% и ~ 3%, LT-40Cu – 60 Вт, 1,7% и 3,4% и LT-50Cu – 75 Вт, 1,63% и 3,4%.

Активные элементы «Кристалл» по эффективности, гарантированной наработке и условиям эксплуатации по отношению к близким зарубежным аналогам более предпочтительны. Съём мощности с единицы активного объёма АЭ примерно в 4 раза, гарантированная наработка в 3 раза больше, чем у аналогов; отпаянное исполнение не требует дополнительных элементов жизнеобеспечения.

Глава пятая посвящена разработке ЛПМ на базе отпаянных АЭ и их применению в медицинских и технологических установках. На основе промышленных отпаянных АЭ «Кристалл» и исследований пространственно-временных и энергетических характеристик выходного излучения разработаны одноканальный ЛПМ «Курс» (ЛГИ-202) со средней мощностью излучения 20-25 Вт и ЧПИ 10 кГц при КПД от сети 0,5% и двухканальный синхронизированный ЛПМ «Карелия», работающий по схеме ЗГ-УМ, с пространственной селекцией излучения мощностью в качественном пучке 30-40 Вт и ЧПИ 10-12 кГц при КПД 0,5%. Излучатель ЛПМ «Курс» имеет оригинальную трубную конструкцию. ЛПМ «Курс» явился основой для создания медицинских установок «Янтарь-2Ф» и «Яхрома-2» с перестраиваемым по длинам волн лазером на красителях, ЛПМ «Карелия» - автоматической лазерной технологической установки (АЛТУ) ЭМ-5029 и «Каравелла».

Описаны состав, конструктивные особенности, параметры и области применения этих приборов. Медицинская установка «Янтарь-2Ф» со световодом для передачи излучения ЛПМ на биологический объект имеет мощность на рабочем конце световода 5-10 Вт и предназначена, в основном, для внутрисосудистого разрушения атеросклеротических бляшек. «Яхрома-2» с длинами волн в диапазоне 0,51-0,67 мкм со световодной передачей имеет мощность 0,5-5 Вт и предназначена для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии. Такого класса установки эффективно используются в дерматологии и косметологии и других направлениях медицины. АЛТУ ЭМ-5029 была использована для скоростного изготовления крупноформатных прецизионных фотошаблонов на стекле с маскирующим покрытием (медь, хром толщиной 0,3 мкм).

АЛТУ «Каравелла» мощностью излучения ≥ 20 Вт предназначена для прецизионной [микро]обработки изделий электронной техники и схемотехники с диаметром пятна фокусировки 20-50 мкм. Фокусировка пучка на объект производится с помощью ахроматического объектива с фокусным расстоянием $F=70$ или 100 мм. Диапазон скоростей перемещения координатного стола ХУ составляет 0,05-6 мм/с, точность позиционирования – 10 мкм.

15 летняя эксплуатация АЛТУ «Каравелла» с уникальным сочетанием параметров выходного излучения (малая длина волны – 0,51 и 0,58 мкм, импульсный режим работы – 10 ± 1 кГц, малая энергия в импульсе – 1-3 мДж, короткий импульс излучения – 20-30 нс, высокая плотность пиковой мощности – 10^9 - 10^{12} Вт/см²) показала бесспорное лидерство применения ЛПМ в технологии прецизионной обработки тонколистовых (0,1-1,0 мм) материалов всех видов. В перечень обрабатываемых материалов включены как тугоплавкие (Mo, W, Ta и др.), так и материалы с высокой теплопроводностью (Cu, Al, Ag, Au) и их сплавы, полупроводники (Si, Ge, GaAs, SiC и др.), керметы, графит, естественные и искусственные алмазы, прозрачные материалы (стекло, кварц, сапфир) и др.

В АЛТУ «Каравелла» в режиме с телескопическим НР ($M = 180$), когда выходное излучение состоит из пучка с дифракционной расходимостью ($\theta_{\text{диф}} = 0,07$ мрад) и пучка с расходимостью в 2 раза большей достигаются минимальные размеры (5-20 мкм) и максимальная производительность обработки (например, при $t_{\text{мат}}=0.1$ -0.2 мм, $V_{\text{обр}}=3$ -3.5мм/с), с одним зеркалом ($R = 3(5)$ см), когда выходное излучение имеет однопучковую структуру ($\theta = 0,3(0,5)$ мрад) с высокой стабильностью ОДН (0,01 мрад), достигается минимальная шероховатость реза (≤ 3 мкм).

В результате многочисленных экспериментов показано, что излучением ЛПМ эффективно производятся следующие технологические операции: сверление отверстий диаметром 5-50 мкм с коэффициентом формы до 40 ($k_f=t_{\text{мат}}/d_{\text{отв}}$), контурная резка с шероховатостью ≤ 5 мкм, скрайбирование, фрезерование, поверхностная обработка, формирование изображений в объеме прозрачных материалов.

Прецизионная обработка излучением ЛПМ имеет следующие преимущества: высокая производительность изготовления деталей по сравнению с известными другими методами обработки (до одного порядка и выше), прогнозируемое и контролируемое удаление обрабатываемого материала микропорциями, малая зона термического влияния (1-3 мкм), высокое соотношение пар/жидкость в продуктах разрушения, отсутствие расслоения материала, возможность обработки сложных поверхностей и под разными углами.

Общие выводы и результаты работы.

1. Широкие возможности применения ЛПМ в науке, технике и медицине определяются уникальным сочетанием параметров излучения: видимый диапазон ($\lambda=0.51$ и 0.58 мкм), высокая частота повторения импульсов

(ЧПИ 5-30 кГц), высокая средняя мощность излучения ($P_{\text{изл}}=1-750$ Вт), высокий КПД (0.5-2%), короткая длительность импульсов излучения ($\tau=10-50$ нс), большое усиление активной среды (десятки и сотни дБ/м), малая импульсная энергия ($W=0.1-100$ мДж) и высокая пиковая мощность ($P_{\text{пик}}=10-1000$ кВт), расходимость излучения близкая к дифракционному пределу и дифракционная, высокая плотность пиковой мощности ($\rho=10^9-10^{14}$ Вт/см²). Таким сочетанием параметров не обладает ни один из известных коммерческих лазеров.

2. Разработан и исследован первый промышленный отпаянный саморазогреваемый АЭ «Кристалл-1» (ГЛ-201) со средней мощностью излучения 10-18 Вт с практическим КПД 0.4-0.7% в диапазоне ЧПИ 3-18 кГц и давлений буферного газа неона 100-760 мм рт.ст.
3. Схема возбуждения с емкостным удвоением напряжения и магнитными звеньями сжатия импульсов тока является самой эффективной тиратронной схемой модулятора накачки.
4. Максимальные мощности излучения, КПД, долговечность и улучшение согласования нагрузки (АЭ) с импульсным модулятором накачки достигаются с генераторами паров меди на молибденовой подложке после восстановления поверхности молибдена и расплавленной меди водородом при рабочей температуре $\sim 1600^\circ\text{C}$, (после цикла обезгаживания АЭ), когда происходит полное смачивание молибдена медью (увеличивается площадь и скорость испарения).
5. Структура выходного излучения ЛПМ в режиме с одним зеркалом – двухпучковая (два пучка сверхсветимости), с оптическим резонатором – многопучковая: два, всегда присутствующих, пучка сверхсветимости и несколько (обычно 2 или 3) резонаторных пучков, количество которых ограничено временем существования инверсии (20-50 нс).
6. Каждый пучок излучения обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками: средней и пиковой мощностью, расходимостью, распределением интенсивности в ближней и дальней зонах, абсолютным значением и процентным содержанием мощности на отдельных длинах волн, импульсной энергией, длительностью, временем возникновения и исчезновения импульсов излучения, стабильностью ОДН и импульсной энергией. Пучки частично перекрываются в пространстве и во времени, конкурируя между собой в процессе формирования.
7. Практическую ценность, в первую очередь, для технологических применений, имеют узконаправленные (качественные) пучки, формируемые в режиме с телескопическим НР и одним выпуклым зеркалом, с которыми в пятне фокусировки достигаются высокие плотности пиковой мощности.
8. С одним выпуклым зеркалом расходимость качественного пучка сверхсветимости, формируемого при участии зеркала при его радиусах кривизны на 2 порядка меньших расстояния от зеркала до выходной

апертуры АЭ становится близкой к дифракционной ($\Theta=2-3 \Theta_{\text{диф}}$). При этом достижимы уровни плотности пиковой мощности $10^{11} - 10^{12}$ Вт/см², что на порядок больше, чем с плоским резонатором и на 1-2 порядка меньше, чем с телескопическим НР.

9. Разработано и исследовано новое поколение АЭ на парах меди со средней мощностью излучения 30-55 Вт с практическим КПД 1.1-1.2% и гарантированной наработкой более 1000 часов: «Кристалл LT-30Cu» (ГЛ-205А), «Кристалл LT-40Cu» (ГЛ-205Б) и «Кристалл LT-50Cu» (ГЛ-205В).
10. Для АЭ серии «Кристалл» особенно важными являются параметры, достигаемые в режиме усилителя мощности (УМ), т.к., в основном, они применяются в мощных системах типа ЗГ-УМ для технологических применений, требующих больших уровней мощности. Средняя мощность излучения, практический и физический КПД АЭ «Кристалл LT-30Cu» в режиме УМ составляют значения ~ 45 Вт, $\sim 1.5\%$ и $\sim 3\%$, «Кристалл LT-40Cu» – 60 Вт, 1.7% и 3.4% и «Кристалл LT-50Cu» – 75 Вт, 1.63% и 3.3%.
11. Отпаянные АЭ серии «Кристалл» по эффективности, гарантированной наработке и условиям эксплуатации по отношению к близким зарубежным аналогам более предпочтительны. Съем мощности излучения с единицы активного объема АЭ примерно в 4 раза выше, минимальная наработка почти в 3 раза больше, а отпаянность исполнения АЭ не требует дополнительных элементов жизнеобеспечения.
12. С использованием АЭ «Кристалл» и результатов исследований пространственно-временных характеристик излучения разработаны одноканальные ЛПМ «Курс» со средней мощностью излучения 20-25 Вт и ЧПИ 10 кГц при КПД от сети $\sim 0.5\%$ и двухканальный синхронизированный ЛПМ «Карелия», работающий по схеме ЗГ-УМ и пространственной селекцией излучения, мощностью в качественном пучке 30-40 Вт и ЧПИ 10-12 кГц при КПД 0.5%. ЛПМ «Курс» явился основой для создания высокоинтенсивных медицинских установок «Янтарь-2Ф» и «Яхрома-2», ЛПМ «Карелия» – основой для автоматической лазерной технологической установки (АЛТУ) ЭМ-5029 и «Каравелла». Описаны состав, конструктивные особенности, параметры этих приборов.
13. Медицинская установка «Янтарь-2Ф» со световодом для передачи излучения ЛПМ на биообъект (5-10 Вт) предназначена для внутрисосудистого разрушения атеросклеротических поражений (бляшек), «Яхрома-2» с длинами волн $\lambda=0.51-0.67$ мкм со световодной передачей (0.5-5 Вт) предназначена для лечения онкологических заболеваний. Такого класса установки эффективно используются в дерматологии и косметологии и других направлениях медицины.

14. 15-летняя эксплуатация АЛТУ «Каравелла» с высоким качеством излучения ($\Theta=(1-5)\Theta_{\text{диф}}$) и мощностью ≥ 20 Вт показала бесспорное лидерство применения излучения ЛПМ в технологии прецизионной [микро]обработки различных материалов: тонколистовых металлов (0.1-1.0 мм) как тугоплавких (Mo, W, Ta), так и с высокой теплопроводностью (Cu, Al, Ag, Au) и их сплавов, полупроводников (Si, Ge, GaAs, SiC), графита, естественных и искусственных алмазов, стекла, кварца, сапфира и др.
15. Излучением ЛПМ эффективно производятся следующие виды технологических операций: сверление микроотверстий диаметром 10-50 мкм с коэффициентом формы до 40 ($K_f=t_{\text{мат}}/d_{\text{отв}}$), прецизионная контурная резка с шероховатостью поверхности реза ≤ 5 мкм, фрезерование, поверхностная обработка, формирование изображений в объеме прозрачных материалов.
16. Прецизионная обработка излучением ЛПМ имеет следующие преимущества: на порядок и выше производительность изготовления деталей по сравнению с известными методами обработки, прогнозируемое и контролируемое удаление материала микропорциями, малая зона термического влияния (1-3 мкм), высокое соотношение пар/жидкость в продуктах разрушения, отсутствие расслоений, возможность обработки сложных поверхностей.
17. Положительные результаты многолетних исследований на макете АЛТУ «Каравелла» явились основанием для проведения ОКР по созданию компактной высокоэффективной промышленной АЛТУ «Каравелла-1» со средней мощностью излучения 15-20 Вт при ЧПИ 15 ± 1 кГц.

Содержание диссертации отражено в 34 публикациях, а основные положения – в 11 следующих работах:

1. Пространственные, временные и энергетические характеристики излучения лазера на парах меди./ В.П.Беляев, В.В.Зубов, А.А.Исаев, Н.А.Лябин и др.// Квантовая электроника.- 1985.- Т.12, № 1.- С.74-79.
2. А.с. 1438549 СССР, кл. H01S3/10. Импульсный безрезонаторный лазер/ Н.А.Лябин (СССР).- № 4211869/ 24-25; Заявл. 19.03.87// Б.И.- 1988.- № 42.
3. Лябин Н.А. Безрезонаторный лазер на парах меди с высоким качеством излучения// Квантовая электроника.- 1989.- Т.16, № 4.- С.652-657.
4. Пат.1813307 СССР, кл.H01S3/041. Лазер на парах металлов /Н.А.Лябин, В.В.Зубов, С.А.Угольников (СССР).- № 4861801/25; Заявл.24.08.90// Б.И.- 1993.- № 16.
5. Industrial sealed-off copper vapor lasers with improved efficiency and radiation power/ N.A.Lyabin, V.V.Zubov, M.E.Koroleva, S.A.Ugolnikov //Journal of Russian Laser Reseach.- 1996.- Vol.17, № 4.- P.346-355.

6. Применение лазеров на парах меди в производстве электронных изделий/ В.М.Жариков, Н.А.Лябин, М.С.Доманов, М.А.Казарян //Лазер-Информ: Информационный бюл.лазерной ассоциации.- 1999.- № 9 (168).- С.2-8.
7. 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.
8. Лазерные терапевтические установки ГНПП «Исток» /А.В.Армичев, М.С.Доманов, Н.А.Лябин, А.Д.Чурсин //Биомедицинская электроника.- 2000.- № 11.- С.24-28.
9. Лазеры на парах металлов: разработка, производство и применение. Н.А.Лябин, А.Д.Чурсин, С.А.Угольников и др.//Квантовая электроника.- 2001.- Т.31, № 3.- С.191-202.
10. Свид.20617 РФ, кл. H01S3/00, 823K26/00. Импульсный лазер на парах металлов/ Н.А.Лябин, А.Д.Чурсин, М.Е.Королева (РФ).- №2001111795/20; Заявл. 03.05.2001// Б.И.- 2001.- № 31.
11. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2000112859/28 с приоритетом от 23.05.2000г. «Разрядная трубка лазера на парах металлов»/ Н.А.Лябин, А.Д.Чурсин.