

Исследование свойств активной среды импульсного лазера на парах меди во времени и разработка на их основе методов оперативного управления параметрами выходного излучения

07, июль 2014

DOI: 10.7463/0714.0717617

Лябин Н. А.^{1,a}, Григорьянц А. Г.², Шиганов И. Н.², Казарян М.А.³

УДК 535.621.37; 621.378.325

¹Россия, «НПП «Исток» им. Шокина»

²МГТУ им. Н.Э. Баумана

³Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН

^alyabin-npk3@mail.ru

Исследованы свойства активной среды (АС) импульсного лазера на парах меди (ЛПМ) во времени и установлено, что АС в отношении к собственному излучению имеет четыре, последовательно идущие друг за другом и повторяющиеся от импульса к импульсу, характерные временные зоны: слабого поглощения длительностью 30-50 нс, усиления длительностью 20-40 нс, полного поглощения длительностью более 1000 нс и максимальной прозрачности длительностью более 1000 нс. Эти свойства АС стали основой для разработки методов и электронных устройств оперативного управления мощностью и частотой повторения импульсов излучения (ЧПИ), включая пакетную и поимпульсную модуляцию, по заданному алгоритму в промышленных ЛПМ и лазерных системах на парах меди (ЛСПМ) нового поколения. На базе такого класса ЛПМ и ЛСПМ создана серия современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов изделий электронной техники (ИЭТ) толщиной 0,02-2 мм с управлением от персонального компьютера (ПК).

Возможность работы АЛТУ «Каравелла» в режимах высокоскоростного управления параметрами лазерного излучения позволяет значительно повысить оперативность управления технологическими процессами изготовления прецизионных деталей, увеличить производительность микрообработки материалов, делать резы и отверстия с минимальной шероховатостью и зоной термического воздействия.

Ключевые слова: импульсный лазер на парах меди, лазерная система на парах меди, активная среда лазера на парах меди, модуляция излучения, методы управления мощностью, микрообработка материалов.

Введение

Импульсный ЛПМ относится к классу газовых лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов и генерирует на переходах с резонансного (г) на

метастабильный(m) уровни на длинах волн 510,6 нм (зеленая) и 578,2 нм(желтая). Вот уже почти пять десятилетий с момента получения первой генерации в ЛПМ [1] усилиями целого ряда научных коллективов, прежде всего США, России Англии и Австралии, для ЛПМ были установлены как основные физические принципы работы, так и принципы его конструирования. Но и в настоящее время интерес исследователей и разработчиков к ЛПМ не ослабевает, т.к. он обладает уникальной совокупностью положительных свойств, весьма полезных для широкого круга практических применений в науке, технике и медицине [2-26]. Наиболее значимыми областями применения являются прецизионная микрообработка материалов ИЭТ, разделение изотопов в атомарных парах, накачка перестраиваемых по длинам волн лазеров на красителях и нелинейных кристаллов, оптические системы с усилители яркости изображения, анализ состава твердых, жидких и газообразных веществ, зондирование атмосферы, нанотехнологии [3-6, 10-17, 20-26].

ЛПМ и создаваемые на его основе ЛСПМ остаются и на сегодня самыми мощными с наносекундной длительностью импульсными источниками когерентного излучения в видимой области спектра. Они отличаются большим усилением АС – $k = 10^1\text{-}10^2$ Дб/м и короткой длительностью импульсов – $\tau_{\text{имп.}} = 10\text{-}40$ нс, высокими частотой повторения импульсов (ЧПИ) – $f = 5\text{-}30$ кГц и съёмом мощности с одного активного элемента (АЭ) – $P_{\text{изл}} = 1\text{-}100$ Вт при КПД 0,5-3%, но относительно низкой импульсной энергией – $W = 0,1\text{-}10$ мДж и дифракционным качеством пучка – $\theta = (1\text{-}2)\theta_{\text{дифр}}$. При этих параметрах плотность пиковой мощности в пятне сфокусированного излучения ($d = 5\text{-}20$ мкм), даже при относительно малых значениях средней мощности ($P_{\text{изл}} = 1\text{-}10$ Вт), достигает очень высоких значений – $\rho = 10^{10}\text{-}10^{11}$ Вт/см², достаточных для производительной и качественной микрообработки металлических материалов и большого круга диэлектриков и полупроводников для ИЭТ [6, 15, 22-26].

С целью обеспечения высокой эффективности работы ЛПМ и ЛСПМ и оперативности управления параметрами выходного излучения и сегодня продолжают исследования по повышению КПД и удельного съёма мощности излучения, частотных характеристик, усилительных свойств АС, пространственных, временных и энергетических характеристик излучения и их взаимосвязи между собой.

Целью настоящей работы является исследование свойств АС импульсного ЛПМ во времени и разработка на их основе методов оперативного управления параметрами выходного излучения. Для выполнения поставленной цели была разработана экспериментальная установка на базе ЛСПМ, работающей по эффективной схеме задающий генератор – пространственный фильтр-коллиматор – усилитель мощности (ЗГ – ПФК – УМ). Исследования свойств АС лазера во времени были проведены методом рассинхронизации в широких пределах (± 1000 нс) светового импульса излучения ЗГ относительно светового импульса УМ от момента максимального усиления. При этом установлено, 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 30-50 нс (возникает на начальной стадии

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

Эти свойства АС стали основой для разработки методов и электронных устройств оперативного управления мощностью и частотой повторения импульсов излучения в промышленных ЛПМ и ЛСПМ нового поколения. В свою очередь, на базе промышленных ЛПМ и ЛСПМ создана серия современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) «Каравелла» с высокоскоростным управлением мощностью по заданному алгоритму от ПК для прецизионной микрообработки материалов ИЭТ толщиной 0,02-2 мм.

1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Она представляет собой ЛСПМ, работающую по эффективной схеме ЗГ – ПФК – УМ [14, 15, 27]. В ЛСПМ в качестве АЭ использовались промышленные отпаянные АЭ на парах меди серии «Кулон»: моделей ГЛ-206Д со средней мощностью излучения 15 Вт и ГЛ-206И мощностью 20 Вт с диаметром разрядного канала $D_k = 14$ мм. В ЗГ использовался АЭ ГЛ-206Д (поз.1), в УМ – АЭ ГЛ-206Д или ГЛ-206И (поз.2). В ЗГ применялся неустойчивый резонатор (НР) телескопического типа с увеличением $M = 180$ с радиусом кривизны глухого вогнутого зеркала $R = 1800$ мм (поз.3). В качестве выходного зеркала НР (поз.4) применялось выпуклое зеркало с $R = 10$ мм. Выпуклое зеркало диаметром $D_3 = 1,5$ мм приклеено к просветленной тонкостенной стеклянной подложке. Коэффициент отражения зеркал, имеющих многослойное диэлектрическое покрытие, составляет 99%.

Разогрев и возбуждение АЭ в ЛСПМ обеспечивались двухканальным ИП, состоящим из блока управления (поз.7), двух идентичных выпрямителей (поз.5) и двух идентичных высоковольтных импульсных модуляторов (поз.6) на базе транзисторных коммутаторов и магнитных звеньев сжатия наносекундных импульсов тока накачки [10, 14, 15, 17]. Электронный блок синхронизации (поз.8) позволял сдвигать во времени друг относительно друга импульсы тока накачки модуляторов ЗГ и УМ с наносекундной точностью в пределах ± 1000 нс.

Для пространственного согласования выходного пучка ЗГ с апертурой АС (разрядного канала) УМ между ЗГ и УМ был установлен ПФК, состоящий из двух вогнутых зеркал (поз.9) с радиусом кривизны $R = 1,2$ м и диафрагмы (поз.10), расположенной в фокальной плоскости зеркал. При этом из выходного пучка излучения ЗГ выделялся пучок с малой расходимостью (дифракционная составляющая). Средняя мощность излучения в ЛСПМ измерялась с помощью преобразователя мощности лазерного излучения ТИ-3, подключенного к милливольтметру М-136 (поз.13). Для регистрации и измерения длительности импульсов излучения были использованы фотозащелка ФЭК-14К (поз.14), на

который излучение отводилось светоделительной пластиной (поз.11), и цифровой осциллограф типа GDS-840S (поз.15). С целью обеспечения линейного режима работы фотоприемников излучение ослаблялось с помощью набора нейтральных калиброванных светофильтров. Исследования параметров излучения ЛСПМ проводились в установившемся оптимальном температурном режиме работы АЭ ($T_{\text{кан}}=1600^{\circ}\text{C}$). Потребляемая мощность от выпрямителя ИП (поз.5) для АЭ ГЛ-206Д и ГЛ-206И при ЧПИ 13-14 кГц составляла около 2,2 и 2,5 кВт соответственно.

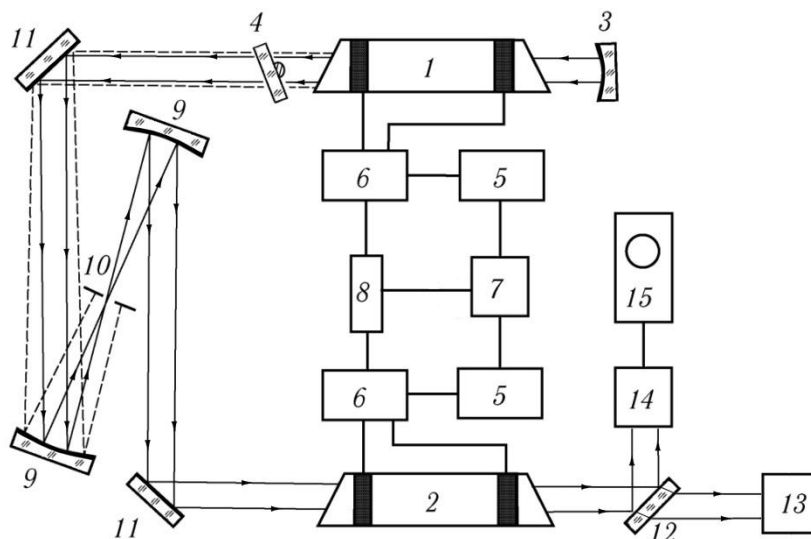


Рис.1. Блок-схема экспериментальной ЛСПМ типа ЗГ – ПФК – УМ с промышленными отпаянными АЭ «Кулон» и телескопическим НР в ЗГ: 1 – АЭ ГЛ-206Д в ЗГ, 2 – АЭ ГЛ-206Д или ГЛ-206И в УМ, 3 – глухое вогнутое зеркало НР, 4 – выходное выпуклое зеркало НР, 5 – высоковольтные выпрямители, 6 – высоковольтные модуляторы наносекундных импульсов накачки, 7 – блок управления ИП, 8 – блок синхронизации каналов с наносекундной длительностью, 9 – зеркала ПФК, 10 – селектирующая диафрагма, 11 – плоские поворотные зеркала; 12 – светоделительная пластина, 13 – милливольтметр с преобразователем мощности лазерного излучения ТИ-3, 14 – фотоэлемент ФЭК-14К, 15 – осциллограф GDS-840S

2. Исследование свойств активной среды импульсного ЛПМ с использованием ЛСПМ

Одной из основных характеристик ЛСПМ является зависимость мощности выходной излучения от рассинхронизации светового импульса ЗГ относительно импульсов УМ. На рис.2 такая зависимость мощности излучения от временной расстройки представлена для ЛСПМ с использованием в ЗГ и УМ одинаковых АЭ модели ГЛ-206Д (ЧПИ 13,6 кГц), на рис.3 – для более мощной ЛСПМ с использованием в качестве УМ АЭ модели ГЛ-206И (ЧПИ 14 кГц).

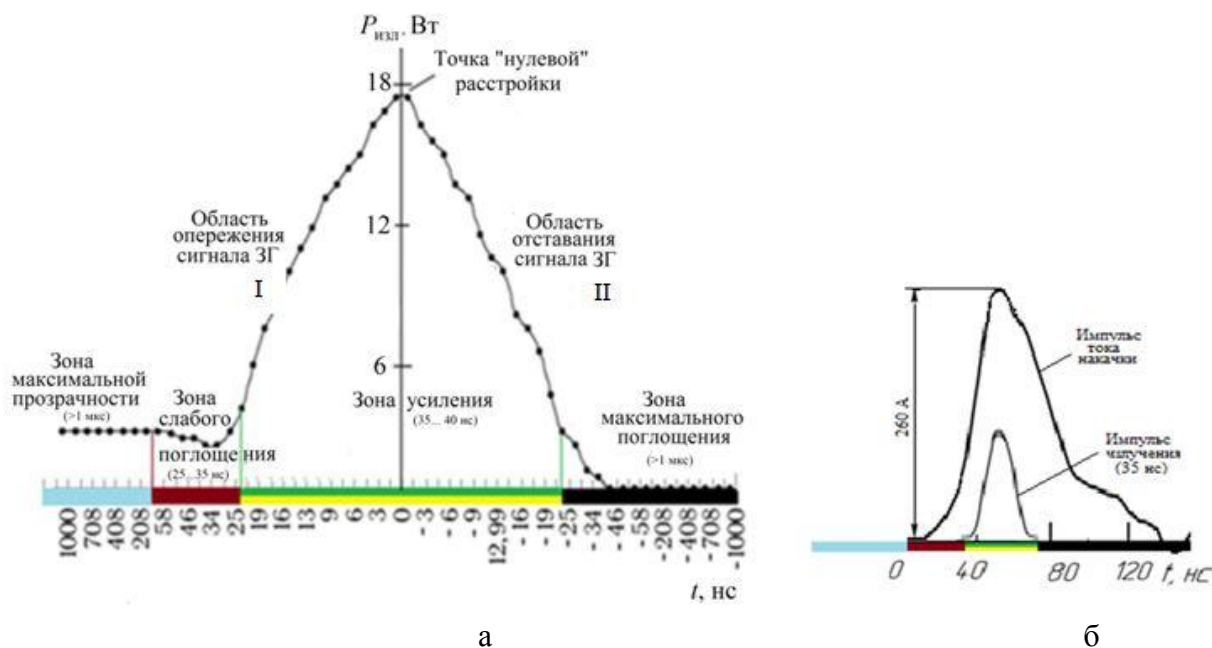


Рис.2. Зависимость выходной средней мощности излучения ЛСПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д от временной расстройки светового импульса излучения ЗГ относительно импульса УМ при ЧПИ 13,6 кГц (а) и импульса тока накачки со световым импульсом излучения (б)

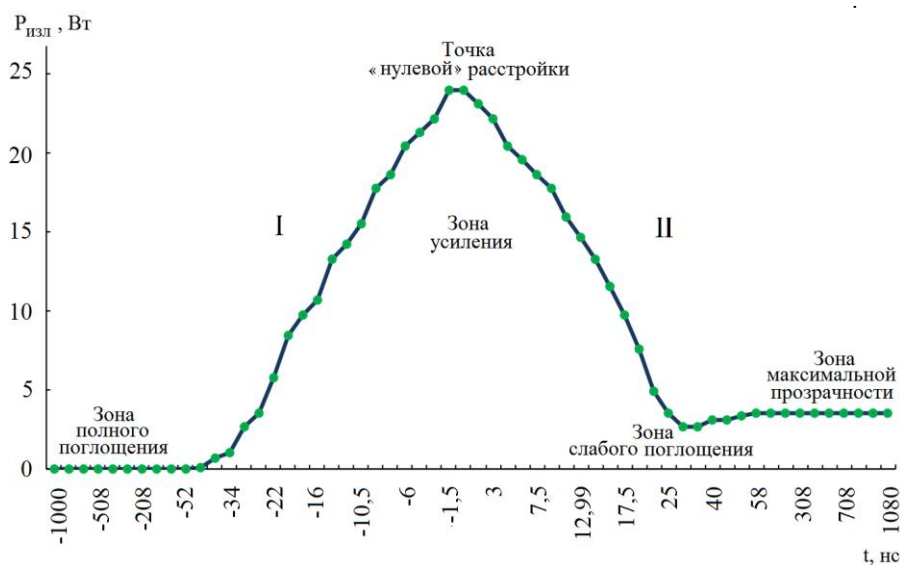


Рис.3. Зависимость выходной средней мощности излучения ЛСПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д в качестве ЗГ и АЭ ГЛ-206И в качестве УМ от временной расстройки светового импульса излучения ЗГ относительно импульса УМ при ЧПИ 14 кГц

Знак «плюс» соответствует опережению (I), знак «минус» – отставанию (II) светового импульса ЗГ относительно импульса УМ. При «нулевой» временной расстройке импульсов ЗГ и УМ выходная мощность излучения и КПД максимальны. Максимальное значение средней мощности излучения ЛСПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д в ЗГ и УМ (рис.2) составляет 16...17 Вт при КПД 0,4 %, с АЭ «Кулон» ГЛ-206И в УМ (рис.3) – 24...25 Вт при КПД 0,5 %. При временной расстройке импульса ЗГ как в сторону отставания от УМ, так

и в сторону его опережения кривая мощности излучения, из-за короткого времени существования инверсии населенностей в АС, падает достаточно резко. При расстройке в пределах ± 25 нс мощность излучения снижается до уровня входного импульса от ЗГ (3...4 Вт). При отставании импульса ЗГ больше чем на 50...60 нс этот импульс полностью поглощается АС УМ из-за резкого увеличения уровня концентрации атомов меди с заселенными метастабильными уровнями на спаде импульса тока разряда. При опережении импульса ЗГ на 25-60 нс имеет место частичное его поглощение, и он достигает минимального значения по мощности (1,8 Вт при $t = 35...40$ нс). Появление зоны слабого поглощения обусловлено заселением метастабильных уровней части атомов меди на начальной стадии медленного развития импульсов тока накачки (разряда), что является ограничением для высокой эффективности возбуждения АС. Последнее приводит к общему снижению КПД и мощности излучения ЛПМ. Для устранения паразитного явления необходимо увеличение скорости нарастания переднего фронта тока, что в свою очередь является сложной задачей из-за наличия индуктивности АЭ. Одним из реальных путей решения этой проблемы считается увеличение напряжения на газоразрядном промежутке АЭ. В нашем случае амплитуда напряжения составляла 15...17 кВ. При опережении на время больше 60 нс АС УМ становится практически прозрачной для импульса ЗГ. В этом режиме средняя мощность пучка излучения ЗГ на входе УМ составляла ~ 4 Вт, а на выходе – 2,5 Вт. Часть мощности – около 0,8 Вт (20%) терялась на окнах АЭ УМ, другая часть – 0,7 Вт (17%) – вероятно, поглощалась в газовой среде. Последнее свидетельствует о том, что АС ЛПМ в межимпульсный период при ЧПИ 13,5-14 кГц полностью не восстанавливается. Таким же образом АС ЛПМ ведет себя и в более широком диапазоне исследуемых нами частот (8...20 кГц).

Таким образом, экспериментально установлено, что АС импульсного ЛПМ имеет четко выделенные четыре характерные временные зоны: зона слабого поглощения, зона усиления, зона полного поглощения и зона максимальной прозрачности.

3. Методы оперативного управления параметрами выходного излучения

Существование четырех временных зон в активной среде ЛПМ стало основой для разработки методов оперативного управления мощностью излучения и частотой повторения импульсов как для ЛПМ с одним АЭ, так и для ЛСПМ, работающей по схеме ЗГ – УМ.

В ЛСПМ управление параметрами выходного излучения достигается рассинхронизацией импульсов излучения ЗГ относительно импульсов УМ за счет изменения времени задержки между импульсами тока накачки каналов ИП. При этом можно оперативно управлять мощностью излучения и частотой повторения импульсов в пределах от нуля до максимального рабочего значения по любому заранее заданному закону (алгоритму), включая пакетную и поимпульсную модуляции излучения. Время выдержки светового импульса ЗГ в зоне поглощения УМ и соответственно время нахождения его в зоне усиления определяет количество импульсов N в пакете излучения за одну секунду:

$$N = f(t_0 - t_1),$$

где $t_0 = 1$ с; t_1 – время выдержки импульса ЗГ в зоне поглощения УМ; f – ЧПИ.

Методы физического управления мощностью излучения в ЛСПМ наглядно объясняются режимами, представленными на рис.4.

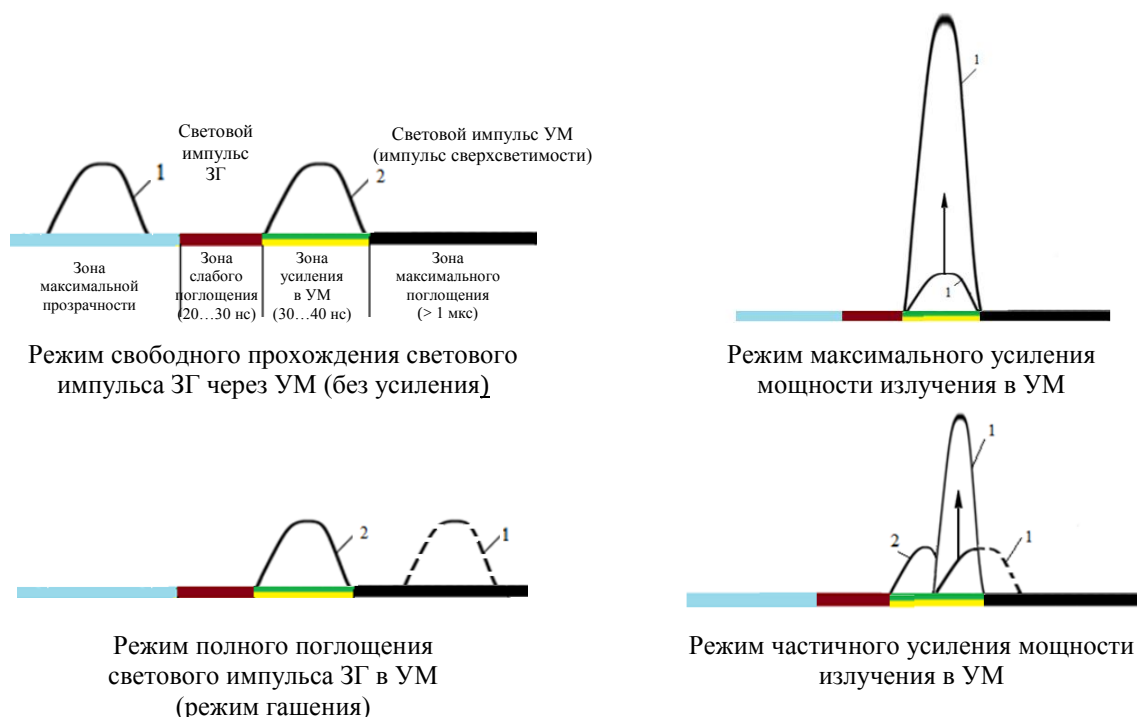


Рис.4. Режимы управления мощностью излучения в ЛСПМ, работающей по схеме ЗГ – УМ

Методы оперативного управления параметрами выходного излучения ЛСПМ защищены патентом на изобретение РФ №2264011 «Способ возбуждения импульсов излучения лазерных систем на самоограниченных переходах» [28]. Они стали основой для разработки электронных устройств оперативного управления мощностью излучения и частотой повторения импульсов в промышленных ЛСПМ. В свою очередь, на базе ЛСПМ созданы современные автоматизированные лазерные технологические установки (АЛТУ) «Каравелла-1» мощностью 10-15 Вт и «Каравелла-1М» мощностью 20-25 Вт с рабочим полем 150x150 мм для прецизионной микрообработки материалов ИЭТ толщиной до 0,5...1 мм и до 1,5...2 мм соответственно [24].

В ЛПМ с одним АЭ управление мощностью излучения и частотой повторения импульсов, включая пакетную и поимпульсную модуляции, обеспечивается за счет введения в источник питания (ИП) маломощного генератора наносекундных импульсов. Этот генератор формирует дополнительный импульс тока накачки с амплитудой в 4-6 раз меньше амплитуды основного импульса тока накачки. Для обеспечения в лазере режима генерации дополнительный маломощный импульс тока формируют после основного импульса возбуждения в зоне поглощения, а для обеспечения режима гашения генерации дополнительный импульс формируют перед основным в зоне прозрачности. Данный метод управления параметрами излучения ЛПМ защищен патентом №2251179 «Способ возбуждения импульсных лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, работающих в ре-

жиме саморазогрева, и устройство для его осуществления» [29]. При этом энергия дополнительных импульсов тока должна быть достаточной только для заселения метастабильных (нижних) лазерных уровней активного вещества (атомов меди) и не должна влиять на процессы их релаксации в плазме в межимпульсный период. Поэтому дополнительный импульс должен находиться вблизи основного импульса тока накачки, возбуждающего резонансные (верхние) уровни атомов меди. Естественно, эффективное управление выходными энергетическими характеристиками лазера обеспечивается в наибольшей мере тогда, когда временная расстройка между дополнительным импульсом тока и основным импульсом возбуждения меньше времени жизни метастабильных уровней ($\geq 1 \dots 2$ мкс). При экспериментальной оптимизации ЛПМ указанная временная расстройка составила ≤ 1 мкс. С точки зрения стабилизации параметров плазмы АС оптимальным является такой режим работы ЛПМ, когда мощность, потребляемая от электрической сети при генерации (при отстающем дополнительном импульсе), равна мощности, потребляемой лазером при гашении генерации (при опережающем дополнительном импульсе). Этот режим достигается путем регулирования фазы и амплитуды дополнительного импульса тока. На рис.5 представлены осциллограммы дополнительного и основного импульсов напряжения накачки (возбуждения) на электродах АЭ, поясняющие работу ЛПМ в режимах гашения и генерации.

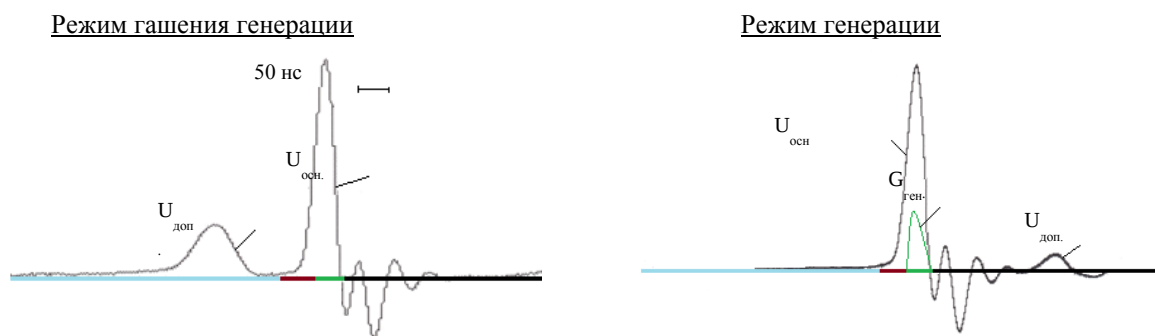


Рис.5. Осциллограммы дополнительного и основного импульсов напряжения накачки на электродах АЭ ЛПМ в режимах гашения и генерации

Данная методика стала основой для разработки промышленных ЛПМ «Кулон-15» с АЭ ГЛ-206Д и «Кулон-20» с АЭ ГЛ-206И с управляемыми энергетическими характеристиками. В этих ЛПМ линии задержки обеспечивают диапазон временного регулирования импульсов до 1300 нс. Регулирование амплитуды основного тока импульса возбуждения обеспечивается до 400 А при длительности его фронта не более 50 нс, амплитуды напряжения – до 20 кВ. Амплитуда дополнительного импульса тока регулируется до 60 А, амплитуда напряжения – до 5 кВ. Длительность импульса основного тока возбуждения по основанию составляет около 120 нс, дополнительного – до 250 нс. Изменение в ИП времени срабатывания регулируемых линий задержки, а также формирование по заранее заданному закону единичных импульсов позволяет осуществлять высокоскоростную им-

пульсную модуляцию лазерного излучения с точностью до одного импульса, изменять ЧПИ генерации и осуществлять любую их последовательность, задавать определенные значения импульсной энергии и т.д. И еще существенно то, что в конструкции ЛПМ предусмотрена возможность управления режимами работы от внешнего персонального компьютера.

Эти преимущества позволили использовать импульсные ЛПМ в современных АЛТУ «Каравелла-2» с рабочим полем 150x100 мм и «Каравелла-2М» с рабочим полем 200x200 мм со средней мощностью излучения 5-8 Вт, позволяющих производить прецизионную микрообработку металлических и широкого круга неметаллических материалов толщиной до 0,3 и 0,7 мм соответственно [24]. Эти АЛТУ также эффективны для прецизионной маркировки и глубокой гравировки деталей с высоким разрешением и нанесения изображений в объемах прозрачных сред.

Возможность работы АЛТУ «Каравелла» в режимах высокоскоростного управления параметрами лазерного излучения, включая пакетную и поимпульсную модуляцию, позволяет значительно повысить оперативность управления технологическими процессами изготовления прецизионных деталей, увеличить производительность микрообработки материалов, делать резы и отверстия с минимальной шероховатостью и зоной термического воздействия.

Заключение

В рамках данной работы экспериментально исследованы во времени свойства АС импульсного ЛПМ с использованием ЛСПМ типа ЗГ – ПФК– УМ и метода рассинхронизации в широких пределах (± 1000 нс) светового импульса излучения ЗГ относительно светового импульса УМ от момента максимального усиления.

Установлено, что АС 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 30-50 нс (возникает на начальной стадии развития импульса тока накачки), усиления длительностью 20-40 нс (возникает на крутом переднем фронте импульса тока), полного поглощения длительностью более 1000 нс (возникает на срезе импульса тока и идет за импульсом) и максимальной прозрачности длительностью более 1000 нс (перед новым импульсом тока).

Эти свойства АС стали основой для разработки методов и электронных устройств оперативного управления мощностью и частотой повторения импульсов излучения (ЧПИ), включая пакетную и поимпульсную модуляцию, по заданному алгоритму в промышленных ЛПМ и ЛСПМ нового поколения. На базе такого класса ЛПМ и ЛСПМ создана серия современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) «Каравелла» с управлением от ПК: «Каравелла-1», «Каравелла-1М», «Каравелла-2» «Каравелла-2М» для прецизионной микрообработки материалов ИЭТ металлических толщиной 0,02-1 мм и неметаллических толщиной до 1,5...2 мм.

Возможность работы АЛТУ «Каравелла» в режимах высокоскоростного управления параметрами лазерного излучения позволяет значительно повысить оперативность управления технологическими процессами изготовления прецизионных деталей, увеличить производительность микрообработки материалов, делать резы и отверстия с минимальной шероховатостью и зоной термического воздействия.

Основные выводы, сделанные в настоящей работе по результатам экспериментальных исследований временных свойств АС ЛПМ, справедливы и для лазеров на **самоограниченных переходах других атомов металлов** и химических веществ.

Список литературы

1. Walter W.T., Piltch M., Solimene N., Gould G. Pulsed laser action in atomic copper vapor // Bull. Amer. Phys. Soc. 1966. Vol. 11, no. 1. P. 113.
2. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью генерации // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1972. Т. 16, № 1. С. 40-42.
3. Бужинский О.И. Эволюция исследований медного лазера и возможности его практического применения: Обзор. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1983. 47 с.
4. Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов: сб. статей / под ред. П.А. Бохана. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1978. 209 с.
5. Солдатов А.И., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
6. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 312 с.
7. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов / В.М. Батенин, В.В. Бучанов, М.А. Казарян [и др.]. М.: Научная книга, 1998. 544 с.
8. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов - 2. В 2 т. Т.1 / В.М. Батенин, А.М. Бойченко, В.В. Бучанов [и др.]; Под ред. В.М. Батенина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 544 с.
9. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов - 2. В 2 т. Т. 2 / В.М. Батенин, П.А. Бохан, А.М. Бойченко [и др.]; Под ред. В.М. Батенина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 616 с.
10. Little C.E. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications. Chichester (UK): J. Wiley and Sons Ltd., 1999. 620 p.
11. Лазерное разделение изотопов в атомарных парах / П.А. Бохан, В.В. Бучанов, Д.Э. Закревский [и др.]. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 208 с.
12. Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах / П.А. Бохан, В.В. Бучанов, Д.Э. Закревский [и др.]. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 208 с.
13. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. Оптические системы с усилителями яркости. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. 173 с.

14. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
15. Лябин Н.А. Разработка и исследование промышленных отпаянных лазеров на парах меди мощностью 10-50 Вт для технологических и медицинских применений: дис. ... канд. техн. наук. г. Фрязино, 2002. 244 с.
16. Перестраиваемый импульсно-периодический конвертор в синей области спектра с накачкой лазером на парах меди / М.А. Казарян, С.В. Кружалов, Н.А. Лябин, Ю.М. Макрушин, А.М. Прохоров, О.В. Шакин // Квантовая электроника. 1998. Т. 25, №9. С. 773-774.
17. Лазерная технологическая установка «Каравелла-1» для прецизионной микрообработки тонколистовых материалов изделий электронной техники / А.Н. Королев, Н.А. Лябин, П.М. Мелешкевич, Ю.А. Будзинский, Е.А. Котюргин, А.Д. Чурсин, В.И. Клименко, В.С. Парамонов, В.И. Кондрашов, Г.М. Парамонова, Г.М. Бахарева // Электронная промышленность. 2006. № 3. С. 61-74.
18. Солдатов А.Н. Достижения и рекорды в лазерах на парах металлов // Известия ВУЗов. Физика. 1999. Т. 42, № 8. С. 23-36.
19. Яковленко С.И. Лазерное выделение промышленных количеств редкого изотопа // Известия ВУЗов. Физика. 1999. Т. 42, № 8. С. 82-87.
20. Евтушенко Г.С. Лазеры на парах металлов для задач атмосферной оптики // Известия ВУЗов. Физика. 1999. Т. 42, № 8. С. 88-95.
21. Пономарев И.В. Применение лазеров на парах металлов в медицине. М.: Физический институт им. Н. Лебедева РАН, 1997. 56 с.
22. Лазеры на парах меди для прецизионной обработки изделий электронной техники / А.Г. Григорьянц, А.Л. Гусев, М.А. Казарян, Н.А. Лябин // Альтернативная энергетика и экология. 2013. Т. 129, № 7. С. 31-43.
23. Исследование структуры и свойств зоны термического воздействия (ЗВТ) после лазерной обработки тонколистовых тугоплавких и теплопроводных материалов / Д.К. Фигуровский, Г.Я. Дальская, Е.И. Тронза, Г.А. Юдин, Н.А. Лябин // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения и информатики: сб. науч. тр. по материалам XIV Международной научно-практической конф. М.: МГУПИ, 2011. С. 221-227.
24. Импульсные лазеры на парах меди, технологическое и медицинское оборудование на их основе / Н.А. Лябин, А.Н. Королев, Е. Н. Покровский, В.Н. Батыгин, П.С. Мелешкевич, А.Д. Чурсин, В.И. Клименко, В.С. Парамонов, Е.А. Котюргин, И.С. Колоколов, Г.М. Парамонова, Л.Л. Бетина, М.Е. Королева, И.В. Каморин // Электронная техника. Сер. 1 СВЧ-техника. 2013. Вып. 3 (518). С. 211-220.
25. Получение цветного кино-, телевизионного 3D изображения на большом экране с использованием импульсных лазеров на парах металлов / А.С. Аверюшкин, В.Л. Ев-

- стигнеев, М.А. Казарян, Н.А. Лябин, Ю.М. Мокрушин, П.И. Ивашкин, В.Е. Роголин, Э.М. Хохлов, О.В. Шакин // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 5-2. С. 87-89.
26. Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: от промышленных до медицинских приложений // Фотоника. 2012. Т. 32, № 2. С. 66-69.
27. Зубов В.В., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. Эффективная система генератор-усилитель на основе лазерных активных элементов на парах меди // Квантовая электроника. 1986. Т. 13, № 12. С. 2431-2436.
28. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Ипполитова З.К. Способ возбуждения импульсов излучения лазерных систем на самоограниченных переходах (варианты) : пат. № 2264011 РФ. МПК⁷ Н 01 S 3/02, 3/09; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». № 2004108765/28; заявл. 24.03.2004.; опубл. 10.11.2005, Бюл. № 31.
29. Лепехин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. Способ возбуждения импульсных лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, работающих в режиме саморазогрева, и устройство для его осуществления: пат. № 2251179 РФ. МПК⁷ Н 01 S 3/097; заявители и патентообладатели авторы. № 2003120867/28; заявл. 11.07.2003; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12.

The Investigation of Properties of Copper Vapor Pulsed Power Active Medium in Time and Development of Operational Control Methods of Output Radiation Parameters on Their Basis

07, July 2014

DOI: 10.7463/0714.0717617

N.A. Lyabin^{1,a}, A.G. Grigor'yanc², I.N. Shiganov I.N.², M.A. Kazaryan³

¹JSC “RPC “Istok” named after A.I.Shokin”, Fryazino, Moscow Region,
141190, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

³P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, Russian Federation

^alyabin-npk3@mail.ru

Keywords: [microprocessing of materials](#), [copper vapor pulsed laser](#), [copper vapor laser system](#), [copper vapor laser active medium](#), [radiation modulation](#), [power control methods](#)

The given paper focuses on the investigation in time of the properties of a pulsed CVL AM using CVLS of the type DO – SFC –PA and mistiming method in wide limits (± 1000 ns) of a DO light radiation pulse relatively to PA light pulse from the moment of maximal amplification.

It was stated that CVL AM in relation to its own radiation has got four characteristic time zones following each other and repeating from pulse to pulse: weak absorption 30-50 ns in length (appears at the initial stage of pulse pump current development), amplification 20-40 ns in length (appears at the sharp leading edge of the current pulse), complete absorption over 1000 ns in length (appears at the pulse current cut and follows the pulse) and maximal transparency over 1000 ns in length (before the new current pulse).

These AM properties have become the basis for developing methods and electron devices of operational control of power and radiation pulse repetition frequency (PRF), including packet and pulse-to-pulse modulation according to preset algorithm in industrial CVLs and CVLSs of new generation. Based on such class of CVLs and CVLSs a set of up-to-date automated laser technological installations (ALTI) “Karavella” with computerized control: “Karavella-1”, “Karavella-1M”, “Karavella-2”, “Karavella-2M” were created for precision microprocessing of materials for electron engineering products (EEP) 0.02 – 2 mm thick.

The capability of ALTI “Karavella” to operate in the modes of high speed control over the laser radiation parameters allows to increase significantly the operational control over technological processes of manufacturing precision parts, to increase the productivity of material microprocessing, to make cuts and holes with minimal roughness and zone of thermal influence.

The main conclusions made in the given paper on the results of experimental investigations of CVL AM time properties are also true for lasers on self-contained transitions of other atoms of metals and chemical agents.

Refereces

1. Walter W.T., Piltch M., Solimene N., Gould G. Pulsed laser action in atomic copper vapor. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1966, vol. 11, no. 1, p. 113.
2. Isaev A.A., Kazaryan M.A., Petrash G.G. Effective Pulsed Copper-vapor Laser with High Average Generation Power. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 1972, vol. 16, no. 1, pp. 40-42. (English translation: *JETP Letters*, 1972, vol. 16, iss. 1, pp. 27-29.).
3. Buzhinskii O.I. *Evoliutsiia issledovaniy mednogo lazera i vozmozhnosti ego prakticheskogo primeneniia: Obzor* [Evolution of studies of the copper laser and its practical applications: Overview]. Moscow, Kurchatov Institute Publ., 1983. 47 p. (in Russian).
4. Bokhan P.A., ed. *Effektivnye gazorazriadnye lazery na parakh metallov: sb. statei* [Effective gas discharge metal vapor lasers: collection of papers]. Tomsk, Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the USSR Academy of Science Publ., 1978. 209 p. (in Russian).
5. Soldatov A.I., Solomonov V.I. *Gazorazriadnye lazery na samoogranichennykh perekhodakh v parakh metallov* [Gas discharge lasers on self-terminating transitions in metal vapor]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 152 p. (in Russian).
6. Grigor'iants A.G., Kazarian M.A., Liabin N.A. *Lazery na parakh medi: konstruktsiia, kharakteristiki i primeneniia* [Copper vapor laser: design, characteristics and applications]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2005. 312 p. (in Russian).
7. Batenin V.M., Buchanov V.V., Kazarian M.A., et al. *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov* [Self-contained metal atom transition lasers]. Moscow, Nauchnaia kniga Publ., 1998. 544 p. (in Russian).
8. Batenin V.M., Boichenko A.M., Buchanov V.V., et al. *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov - 2. V 2 t. T.1* [Self-contained metal atom transition lasers – 2. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 544 p. (in Russian).
9. Batenin V.M., Bokhan P.A., Boichenko A.M., et al. *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov - 2. V 2 t. T. 2* [Self-contained metal atom transition lasers – 2. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 616 p. (in Russian).
10. Little C.E. *Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications*. Chichester (UK), J. Wiley and Sons Ltd., 1999. 620 p.

11. Bokhan P.A., Buchanov V.V., Zakrevskii D.E., et al. *Lazernoe razdelenie izotopov v atomarnykh parakh* [Laser isotope separation in atomic vapors]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004. 208 p. (in Russian).
12. Bokhan P.A., Buchanov V.V., Zakrevskii D.E., et al. *Opticheskoe i lazerno-khimicheskoe razdelenie izotopov v atomarnykh parakh* [Optical and laser-chemical isotope separation in atomic vapors]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010. 208 p. (in Russian).
13. Pasmanik G.A., Zemskov K.I., Kazapian M.A. *Opticheskie sistemy s usiliteliami iaplosti* [Optical systems with brightness amplifiers]. Gor'kii, Institute of Applied Physics of the USSR Academy of Sciences Publ., 1988. 173 p. (in Russian).
14. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser machining]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 664 p. (in Russian).
15. Liabin N.A. *Razrabotka i issledovanie promyshlennykh otpaiannykh lazerov na parakh medi moshchnost'iu 10-50 Vt dlia tekhnologicheskikh i meditsinskikh primenenii. Kand. diss.* [Development and research of industrial sealed-off copper vapor lasers capacity of 10-50 watts for technological and medical applications. Cand. diss.]. Friazino, 2002. 244 p. (in Russian).
16. Kazaryan M.A., Kruzhalov S.V., Lyabin N.A., Mokrushin Yu.M., Parfenov V.A., Prokhorov A.M., Shakin O.V. Tunable pulse-periodic converter operating in the blue part of the spectrum and pumped by a copper vapour laser. *Kvantovaya elektronika*, 1998, vol. 25, no. 9, pp. 773-774. (English translation: *Quantum Electronics*, 1998, vol. 28, no. 9, pp. 751-752).
17. Korolev A.N., Liabin N.A., Meleshkevich P.M., Budzinskii Iu.A., Kotiurgin E.A., Chursin A.D., Klimenko V.I., Paramonov V.S., Kondrashov V.I., Paramonova G.M., Bakhareva G.M. Laser process unit "Karavella-1" for precision micromachining of thin materials of electronic devices. *Elektronnaya promyshlennost'*, 2006, no. 3, pp. 61-74. (in Russian).
18. Soldatov A.N. Advances and breakthroughs in metal vapor lasers. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Fizika*, 1999, vol. 42, no. 8, pp. 23-36. (English translation: *Russian Physics Journal*, 1999, vol. 42, iss. 8, pp. 678-690. DOI: [10.1007/BF02509340](https://doi.org/10.1007/BF02509340)).
19. Iakovlenko S.I. Laser separation of rare isotopes in industrial-scale quantities. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Fizika*. 1999, vol. 42, no. 8, pp. 82-87. (English translation: *Russian Physics Journal*, 1999, vol. 42, iss. 8, pp. 732-736. DOI: [10.1007/BF02509350](https://doi.org/10.1007/BF02509350)).
20. Evtushenko G.S. Metal-vapor lasers for problems of atmospheric optics. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Fizika*, 1999, vol. 42, no. 8, pp. 88-95. (English translation: *Russian Physics Journal*, 1999, vol. 42, iss. 8, pp. 737-743. DOI: [10.1007/BF02509351](https://doi.org/10.1007/BF02509351)).
21. Ponomarev I.V. *Primenenie lazerov na parakh metallov v meditsine* [The use of metal vapor lasers in medicine]. Moscow, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences Publ., 1997. 56 p. (in Russian).
22. Grigiryants A.G., Gusev A.L., Kazaryan M.A., Lyabin N.A. Lasers based on copper vapors for precision processing of parts for electronic equipment. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative energy and ecology*, 2013, vol. 129, no. 7, pp. 31-43. (in Russian).

23. Figurovskii D.K., Dal'skaia G.Ia., Tronza E.I., Iudin G.A., Liabin N.A. Research of the structure and properties of the heat affected zone (HAZ) after laser treatment of thin sheet refractory and heat-conductive materials. *Fundamental'nye i prikladnye problemy priborostroeniia i informatiki: sb. nauch. tr. po materialam 14 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konf.* [Fundamental and applied problems of instrument engineering and informatics: collection of scientific papers based on the proc. of the 14th international scientific and practical conference]. Moscow, MGUPI Publ., 2011, pp. 221-227. (in Russian).
24. Liabin N.A., Korolev A.N., Pokrovskii E.N., Batygin V.N., Meleshkevich P.S., Chursin A.D., Klimenko V.I., Paramonov V.S., Kotiurgin E.A., Kolokolov I.S., Paramonova G.M., Betina L.L., Koroleva M.E., Kamorin I.V. Pulsed copper vapor lasers, technological and medical equipment on their basis. *Elektronnaia tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic engineering. Ser. 1. Microwave engineering], 2013, iss. 3 (518), pp. 211-220. (in Russian).
25. Averyushkin A.S., Evstigneev V.L., Kazaryan M.A., Lyabin N.A., Mokrushin Yu.M., Ivashkin P.I., Rogalin V.E., Khokhlov E.M., Shakin O.V. Projection systems for 3D color television images based on metal vapor lasers. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya = Alternative energy and ecology*, 2013, no. 5-2, pp. 87-89. (in Russian).
26. Liabin N.A. [Copper Vapor Lasers. From Industrial to Medical Applications]. *Fotonika*, 2012, vol. 32, no. 2, pp. 66-69. (in Russian).
27. Zubov V.V., Liabin N.A., Chursin A.D. [Efficient master-oscillator-amplifier system utilizing copper vapor laser active elements]. *Kvantovaya elektronika*, 1986, vol. 13, no. 12, pp. 2431-2436. (English translation: *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1986, vol. 16, no. 12, pp. 1606-1610. DOI: [10.1070/QE1986v016n12ABEH008501](https://doi.org/10.1070/QE1986v016n12ABEH008501))
28. Liabin N.A., Chursin A.D., Ippolitova Z.K. *Sposob возбужdeniia impul'sov izlucheniia lazernykh sistem na samoogranichennykh perekhodakh (varianty)* [The method of excitation of radiation pulses of laser systems on self-contained transition (options)]. Patent RF, no. 2264011, 2005. (in Russian).
29. Lepekhin N.M., Priseko Iu.S., Filippov V.G., Liabin N.A., Chursin A.D. *Sposob возбужdeniia impul'snykh lazerov na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov, rabotaiushchikh v rezhime samorazogreva, i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia* [The method of excitation of pulsed lasers on self-contained metal atom transition, working in the mode of self-heating, and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2251179, 2005. (in Russian).