

## Разработка, производство и применение отпаянных лазеров на парах меди и золота

Н.А.Лябин\*, А.Д.Чурсин\*, С.А.Угольников\*, М.Е.Королева\*, М.А.Казарян\*\*

*Дан анализ современного состояния научных и научно-технических разработок в области импульсно-периодических саморазогреваемых лазеров на парах металлов (меди и золота), базирующихся на промышленных отпаянных высокотемпературных металлокерамических и металлостеклянных конструкциях активных элементов; указаны их основные применения. Рассмотрены энергетические, пространственные и временные характеристики таких лазеров и прослежена их зависимость от параметров и конструктивных особенностей лазерных активных элементов (трубок) и оптических резонаторов. Проанализированы пути создания новых мощных промышленных лазерных активных элементов с высоким КПД (1–2%) и со сроком службы 500–1000 ч. При длине лазерной трубки 150 см и ее диаметре 32 мм реализована средняя мощность генерации 80 Вт. При повышении эффективности накачки за счет увеличения напряжения до 30–35 кВ такая система в лазере на парах меди позволит достигнуть мощности 100 Вт от одного активного элемента. Приведены сравнительные характеристики промышленных вариантов лазеров на парах металлов в различных странах и дан их анализ.*

**Ключевые слова:** саморазогреваемые лазеры, импульсно-периодические лазеры, система генератор–усилитель, неустойчивый резонатор, промышленные лазеры.

### 1. Введение

С тех пор как в 1965 г. впервые была получена генерация на самоограниченных переходах атомов металлов, прошло 35 лет [1–3]. К моменту написания настоящей работы определены основные принципы конструирования лазеров на парах меди (ЛПМ) и практически завершены исследования физических процессов, протекающих в их активных средах и определяющих их основные характеристики [4–9]. В настоящее время такая ситуация способствует формированию широкого круга применений, а также использованию некоторых новых возможностей упомянутых лазеров [8, 9]. Все это повышает интерес к разработке промышленных вариантов лазеров на парах металлов. Ретроспективный взгляд на историю развития лазеров на парах металлов показывает, что на начальном этапе на стратегию и тактику развития таких лазеров существенное влияние оказали работы [4, 5, 10–13]. На сегодняшний день реализованы несколько способов и систем возбуждения: продольным и поперечным разрядами, в полой катодной и электронным пучком, газодинамические, прокачные и взрывные системы и др. Яркий представитель этих лазеров – ЛПМ. Он является самым мощным и эффективным лазером в видимой области спектра. С одного активного элемента (АЭ) в таком лазере удается получить среднюю мощность 100–750 Вт при КПД 1–3% [8, 9].

Развитие работ по созданию промышленных лазеров

на парах металлов было связано с запуском первого саморазогреваемого ЛПМ [11, 14] и практически берет начало в 1971 г. В последующие несколько лет в ГНПП «Исток» совместно с ФИАН были разработаны и произведены первые в СССР промышленные варианты отпаянных саморазогреваемых лазеров на парах металлов [15–17]. Ниже дан обзор научно-технических разработок коммерческих отпаянных лазеров на парах меди и золота, выпускаемых в ГНПП «Исток». Впервые описаны комплексные исследования, направленные на повышение эффективности, мощности, качества излучения и долговечности этих лазеров, а также указаны их основные применения.

Одним из важных применений ЛПМ является лазерное разделение изотопов различных атомов по методике AVLIS, которая использует различие спектров поглощения атомов разного изотопического состава. Технология AVLIS базируется на применении перестраиваемых по частоте лазеров на красителях, накачиваемых ЛПМ. Такие технологии подробно рассмотрены в работах [8, 9, 18, 19]. Другое бурно развивающееся направление – так называемые оптические системы с усилением яркости изображения [20]. В этих системах в качестве усилителя яркости используются активные среды лазеров на парах меди, золота, бария и т. д. [21–30].

Заметное место в кругу применений ЛПМ, как и следовало ожидать, занимает прецизионная обработка материалов [24]. Лазеры на парах меди и золота как в отдельности, так и в сочетании с перестраиваемыми лазерами на красителях находят широкое применение в медицине. Особенно важным представляется использование их для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии [31–35]. Другим удачным их применением можно считать лечение сосудистых повреждений кожи, так называемых винных пятен, гемангиом, ангиом, а также пигментных повреждений [32].

\*Государственное научно-производственное предприятие «Исток», Россия, 141190 Фрязино Моск. обл., Вокзальная ул., 2а

\*\*Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 117924 Москва, Ленинский просп., 53; эл. почта: kazar@sci.lebedev.ru

Табл.1. Основные технические параметры АЭ «Кулон».

Модель АЭ	Лазер	Лазерная среда	$p_{Ne}$ (мм рт. ст.)	$\lambda$ (нм)	$P_{grad}$ (Вт)		$P_{510.6}:P_{578.2}$	$f_{opt}$ (кГц)	Диапазон $f$ (кГц)
					питание I	питание II			
LT-1Cu	ГЛ-206А	медь	600	510.5; 578.2	–	1.2–1.4	3:2	15–18	8–25
LT-1.5Cu	ГЛ-206Б	медь	600	510.5; 578.2	–	1.5–2.0	3:2	15–18	8–25
LT-3Cu	ГЛ-206В	медь	450	510.5; 578.2	6	3.5–4.0	3.5:2	14–17	8–17
LT-5Cu	ГЛ-206Г	медь	300	510.5; 578.2	9	5–7	3.5:2	14–17	8–17
LT-6Cu	УЛ-102	медь	300	510.5; 578.2	15	6–8	5:3	10–12	8–14
LT-10Cu	ГЛ-206Д	медь	300	510.5; 578.2	15	10–11	3:2	14–17	8–17
LT-1Au	ГЛ-206Е	золото	300	627.8	1.3	–	–	14–17	10–17
LT-1.5Au	ГЛ-206Ж	золото	300	627.8	1.8	–	–	14–17	10–17

Примечания:  $p_{Ne}$  – давление буферного газа неона;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $P_{grad}$  – суммарная средняя мощность излучения (при оптимальном модуляторе с емкостью накопительного конденсатора  $C_s = 1500$  пФ (рис.3,а);  $P_{510.6}$  и  $P_{578.2}$  – мощности излучения на  $\lambda = 510.6$  и  $578.2$  нм соответственно;  $V$  – объем активной среды;  $\tau_1$  – время готовности (при номинальной потребляемой мощности);  $P_{rec}$  – потребляемая мощность;  $Q$  –

Табл. 2. Основные технические параметры АЭ «Кристалл».

Модель АЭ	Лазер	Лазерная среда	$p_{Ne}$ (мм рт. ст.)	$\lambda$ (нм)	$P_{grad}$ (Вт)		$P_{510.6}:P_{578.2}$	$f_{opt}$ (кГц)	Диапазон $f$ (кГц)
					режим генерации*	режим усиления*			
LT-30Cu	ГЛ-205А	медь	250	510.6; 578.2	30–32	40–45	1:1	10–12	8–20
LT-40Cu	ГЛ-205Б	медь	180	510.6; 578.2	39–41	55–60	1:1	10–12	8–20
LT-50Cu	ГЛ-205В	медь	150	510.6; 578.2	47–50	65–70	3:2	10–12	8–20
LT-4Au	ГЛ-205Г	золото	200	627.8	4–6	–	–	14–17	10–20

\*Питание от тиратронного модулятора с удвоением напряжения (рис.3,б).

Лазеры на парах металлов в сочетании с лазерами на красителях, позволяющие получать эффективную (20–30 %) мощную перестраиваемую генерацию в видимой и ближней ИК областях спектра, широко применяются и для спектроскопических исследований. С достаточно высокой эффективностью (~10%) удается с помощью кристаллов преобразовывать излучение ЛПМ во вторую гармонику, т. е. в УФ область спектра, при средней выходной мощности 1–9 Вт. Излучение ЛПМ используется также для накачки лазера на  $Al_2O_3:Ti^{3+}$  для получения перестраиваемой генерации в ближней ИК области спектра, а при удвоении частоты – и в синей области спектра [36]. Такие многочастотные импульсно-периодические перестраиваемые лазерные системы с большой средней мощностью генерации являются уникальными.

Кроме того, эти лазеры и приборы на их основе уже в течение многих лет используются для атмосферных исследований [37], исследования комбинационного рассеяния света, преобразования изображений, обращения волнового фронта, генной инженерии, высокоскоростной фотографии и голографии, голографического кино, спектроскопических и масс-спектроскопических исследований, визуализации газовых потоков, лазерного ускорения микрочастиц, астрономических исследований, проекционной микроскопии, кино и телевидения, навигации и мониторинга, усиления ультракоротких импульсов и т. п. [8, 9].

Ход развития исследований в вышеуказанных областях широко обсуждался в последнее время, в частности на многочисленных всероссийских и международных конференциях («Лазеры на парах металлов» (Новороссийск, 1998 г., Лазаревское, 2000 г.), LASER's (США, 1998 г., Канада, 1999 г.), «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (Томск, 1997 г., 1999 г.) и др.), что способствует стабильному интересу к такой лазерной продукции со стороны как научных, так и производственных предприятий.

Лазерная продукция ГНПП «Исток» поставляется в ряд ведущих научных и производственных организаций России, а также в некоторые страны ближнего и дальнего зарубежья. На территории России поставки осуществляются в ГНЦ «Курчатовский институт» и ЗАО «Алтек» (Москва), НПО «Лад» (Химки), «Латра» (Троицк Моск. обл.), ИФП (Новосибирск), НИИЭФА и ПТУ (Санкт-Петербург), ФИАН, ИОФАН, ИВТАН (Москва), ИСАН (Троицк Моск. обл.), ИОА СО РАН и ТГУ (Томск) и в другие организации.

За истекшие три года в ГНПП «Исток» проведена модернизация производственной и технологической базы, увеличено число выпускаемых приборов. Средний годовой объем продаж лазерных активных элементов составляет 70–100 штук.

## 2. Конструкция и основные параметры АЭ лазеров на парах меди и золота серий «Кулон» и «Кристалл»

В ГНПП «Исток» в 1998 г. закончена разработка и начат выпуск новых моделей высокоэффективных промышленных отпаянных саморазогреваемых АЭ лазеров на парах металлов серии «Кулон» с выходной средней мощностью излучения от 1 до 15 Вт (ГЛ-206 (А, Б, В, Г, Д, Е, Ж)) и серии «Кристалл» с мощностью от 20 до 50 Вт (ГЛ-205 (А, Б, В, Г)) [38–45]. В настоящее время продолжают работы по совершенствованию лазеров этого класса с целью повышения их надежности и качества, а также увеличения мощности до 100 Вт и более в одном АЭ.

Основные технические параметры новых моделей АЭ серии «Кулон» представлены в табл.1, серии «Кристалл» – в табл.2, габаритные и присоединительные размеры и масса – на рис.1 и в табл.3, внешний вид – на рис.2, схемы возбуждения – на рис.3. Устаревшие модели ТЛГ-5 (1975 г.), УЛ-101 (1976 г.), УЛ-102, ГЛ-201 и ГЛ-202 (1982 г.), ГЛ-204 (1986 г.) отличаются от новых в основном боль-

$\tau$ (нс)	$d$ (мм)	$L$ (мм)	$V$ (см <sup>3</sup> )	Расходимость (мрад)		$\tau_1$ (мин)	$P_{\text{rec}}$ (кВт)	$Q$ (ч)
				ПР	НР			
10–15	7	140	4.2	6	0.3	25	0.65	1000
10–15	7	175	5.7	5.5	0.3	25	0.75	1000
17–20	12	340	28	6	0.3	45	1.15	1000
17–20	14	340	38	6.5	0.3	50	1.2–1.5	1000
20–25	20	470	116	7	0.3	50	1.7–2.1	500
17–20	14	490	65	4.5	0.3	50	1.5–1.8	1000
15–18	14	340	38	6	0.3	50	1.4	500
15–18	14	490	65	4	0.3	60	1.9	500

ной частоте следования импульсов); питание I – от тиратронного модулятора с удвоением напряжения (рис.3,б); питание II – от тиратронного ветственно;  $f$  – частота следования импульсов;  $\tau$  – длительность импульса излучения;  $d$  – диаметр разрядного канала;  $L$  – длина разрядного канала;  $Q$  – гарантируемая наработка; ПР – плоский резонатор; НР – неустойчивый резонатор.

$\tau$ (нс)	$d$ (мм)	$L$ (мм)	$V$ (см <sup>3</sup> )	Расходимость (мрад)		$\tau_1$ (мин)	$P_{\text{rec}}$ (кВт)	$Q$ (ч)
				ПР	НР			
10–20	20	900	250	4	0.1–0.5	60	2.9–3.1	1000
10–20	20	1200	350	3	0.1–0.5	60	3.6–3.9	1000
20–30	32	1200	900	5	0.1–0.5	80	4.3–4.7	500
10–20	20	900	250	4	0.1–0.5	60	3.5–3.8	500

Табл.3. Параметры АЭ (см рис.1).

Модель	$L_1$ (мм)	$L_2$ (мм)	$d_1$ (мм)	$d_2$ (мм)	$a$ (мм)	Масса (кг)
LT-1Cu	330	145	84	55	14	1
LT-1.5Cu	380	185	84	55	14	1
LT-3Cu	600	318	100	73	14	2.4
LT-5Cu	600	318	100	73	14	2.6
LT-6Cu	770	480	140	90	19	5
LT-10Cu	770	495	100	73	14	3.3
LT-1Au	600	485	100	73	14	2.6
LT-30Cu	1315	916	134	90.5	19	11
LT-40Cu	1621	1222	134	90.5	19	13.5
LT-50Cu	1627	1227	134	90.5	19	15
LT-4Au	1313	916	134	90.5	19	11

шей потребляемой мощностью, меньшими КПД и сроком службы.

Конструктивно АЭ представляет собой цилиндрический вакуумноплотный диэлектрический корпус с концевыми стеклянными секциями и впаянными в них оптическими окнами для выхода лазерного излучения. Для устранения паразитной связи выходных окон с активной средой угол между плоскостями окон и оптической осью прибора составляет  $76-78^\circ$ .

Разрядный канал состоит из набора керамических трубок, соединенных втулками. Процентное содержание окиси алюминия  $Al_2O_3$  равно 99.8% [46]. В местах сое-

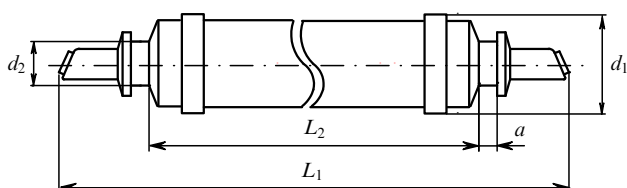


Рис.1. Схема активного элемента (см. табл.3).

динений расположены генераторы активного вещества – паров металла. Вольфрамобариевый катод обеспечивает высокую степень локализации и стабильности импульсного дугового разряда. На концах разрядного канала установлены ловушки для защиты выходных окон, в основном от паров активного вещества и частиц, вылетающих с рабочих участков катода и анода. Мощный теплоизоляционный слой, расположенный между разрядным каналом и вакуумноплотной оболочкой, обеспечивает при относительно невысоких потребляемых мощностях (0.5–4.7 кВт) высокие рабочие температуры разрядного канала (1500–1700°C). В качестве буферного газа используется неон высокой чистоты.

Малогабаритные (до 0.77 м) и с низким электропотреблением (до 2.1 кВт) АЭ серии «Кулон» имеют преимущественно металлоглазную вакуумноплотную оболочку (корпус) и эксплуатируются в режиме с воздушным охлаждением. Напротив, АЭ серии «Кристалл», имеющие примерно в 2 раза большую длину (около 1.5 м), вес до 15 кг и потребляемую мощность до 4.7 кВт, изготавливаются в основном в металлокерамическом варианте и требуют водяного охлаждения. В этом случае АЭ устанавливается внутри водоохлаждаемого кожуха цилиндрической или прямоугольной формы с расходом воды

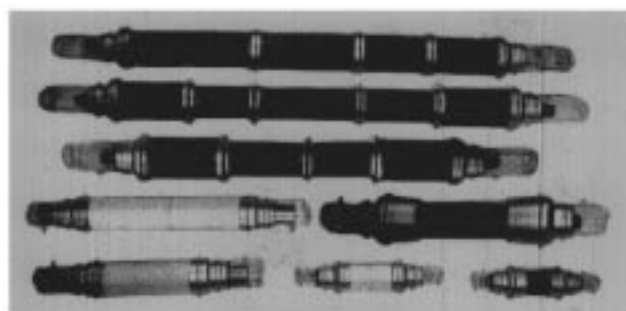


Рис.2. Внешний вид активных элементов.

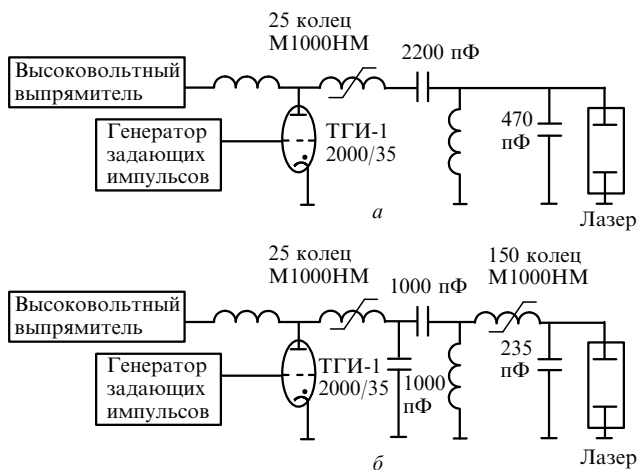


Рис.3. Схемы импульсного источника питания: «традиционная» (а) и с удвоением напряжения (б).

до 5 л/мин. Кожух обычно выполняет и функцию обратного токопровода.

Параметры АЭ, приведенные в табл.1 и 2, получены и оптимизированы в основном при использовании схемы емкостного удвоения напряжения и магнитного звена сжатия (рис.3,б) [47, 48]. В АЭ «Кристалл», объем активной среды которых на 1–2 порядка больше, чем у АЭ «Кулон», при использовании схемы удвоения напряжения получено увеличение мощности излучения до 2 раз. По достигнутым удельным характеристикам промышленные отпаянные АЭ, разработанные ГНПП «Исток», в стационарном режиме превосходят известные отечественные и зарубежные аналоги.

### 3. Результаты исследований АЭ ЛПМ серии «Кристалл» (LT-30Cu, LT-40Cu, LT-50Cu)

#### 3.1. Традиционная схема возбуждения

На рис.4,а представлены экспериментальные характеристики АЭ «Кристалл» LT-30Cu при «традиционной»

схеме возбуждения (рис.3,а) в зависимости от мощности  $P_{rec}$ , отбираемой от выпрямителя, в установившихся тепловых режимах при частоте следования импульсов  $f = 10$  кГц, давлении буферного газа неона  $p_{Ne} = 150$  мм рт. ст., емкости накопительного конденсатора  $C_s = 2200$  пФ и емкости обострительного конденсатора  $C_{peak} = 470$  пФ. Из хода кривых видно, что генерация возникает при температуре разрядного канала  $T \sim 1300$  °С ( $P_{rec} = 1.6$  кВт), т. е. при концентрации атомов меди  $n = 7 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> ( $p_{Cu} \approx 0.01$  мм рт. ст.) [49]. Максимальная мощность излучения 20 Вт (кривая 1 на рис.4,а) достигается при температуре  $T = 1550$  °С ( $P_{rec} = 2.7$  кВт), которой соответствует  $n = 2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> ( $p_{Cu} \approx 0.35$  мм рт. ст.). При этой температуре мощность излучения на отдельных длинах волн также максимальна: 11 Вт (55 %) на  $\lambda = 0.51$  мкм и 9 Вт (45 %) на  $\lambda = 0.58$  мкм.

При увеличении температуры выше 1550 °С мощность падает, причем на зеленой линии (0.51 мкм, кривая 2 на рис.4,а) значительно круче, чем на желтой (кривая 3). Последнее может быть связано с тем, что нижний (метастабильный) уровень для желтой линии расположен выше, чем для зеленой, и, соответственно, менее подвержен тепловому заселению. Полный срыв генерации на зеленой линии происходит при температуре разрядного канала  $T \sim 1650$  °С ( $P_{rec} = 3.2$  кВт), на желтой – при  $T = 1700$  °С ( $P_{rec} = 3.4$  кВт).

Для того чтобы проиллюстрировать эффективность рассматриваемой схемы, на рис.4,а (кривые 6–8) представлены осциллограммы импульсов напряжения, тока и излучения в оптимальном тепловом режиме АЭ – режиме максимальной мощности излучения. Длительность импульсов тока по основанию составила  $\sim 300$  нс, что примерно в 7 раз больше длительности импульса излучения (кривая 8), т. е. практически времени существования инверсии.

По этой причине при использовании «традиционной» схемы возбуждения нельзя было ожидать высокоэффективной работы лазера – максимальный КПД по мощности, отбираемой от выпрямителя, составил всего  $\sim 0.75\%$ .

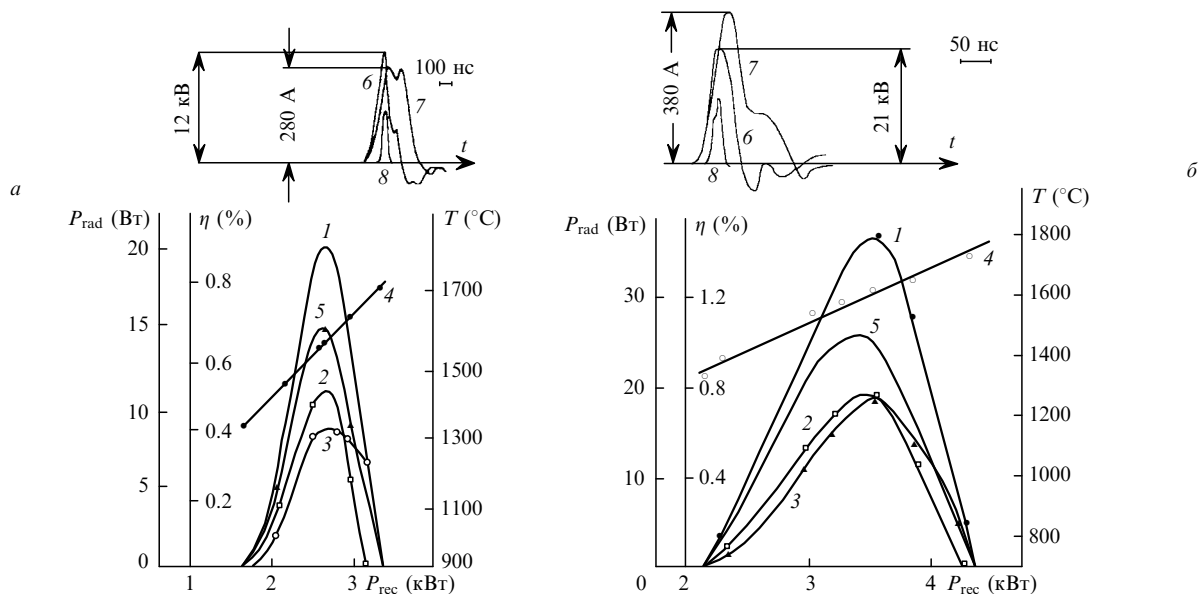


Рис.4. Зависимости суммарной средней мощности излучения  $P_{rad}$  (1), мощности на длинах волн 0.51 (2) и 0.58 мкм (3), температуры разрядного канала АЭ (4), КПД  $\eta$  (5) от мощности, потребляемой АЭ «Кристалл» LT-30Cu от выпрямителя при традиционной схеме возбуждения (а) и при схеме удвоения напряжения (б), а также осциллограммы импульсов напряжения (6), тока разряда (7) и излучения (8) АЭ.

### 3.2. Схема возбуждения с емкостным удвоением напряжения и магнитным звеном сжатия

При использовании схемы удвоения напряжения (см. рис.3,б) длительности импульсов возбуждения уменьшаются примерно в 2 раза по сравнению с таковыми при использовании «традиционной» схемы. На рис.4,б представлены энергетические характеристики лазера в установленных тепловых режимах в зависимости от мощности, отбираемой от выпрямителя, и осциллограммы импульсов возбуждения в режиме максимальной мощности излучения (оптимальном тепловом режиме) при частоте следования импульсов  $f = 10$  кГц, емкости накопительного конденсатора  $C_s = 1000$  пФ + 1000 пФ = 2000 пФ, емкости обестраивающего конденсатора  $C_{peak} = 235$  пФ и давления неона  $p_{Ne} = 150$  мм рт. ст. Длительность импульса напряжения (кривая б) составила около 100 нс при амплитуде 21 кВ, длительность импульса тока (кривая в) – 160 нс при амплитуде 380 А.

Как и в «традиционной» схеме, в схеме рис.3,б генерация возникает при температуре разрядного канала  $T \sim 1300$  °С (кривая 4 на рис.4,б) ( $P_{rec} = 2.2$  кВт). Максимальные же мощности излучения (37 Вт) и КПД ( $\sim 1\%$ ) (кривая 5) достигаются при температуре, на 80 °С выше, т. е. при  $T = 1630$  °С ( $P_{rec} = 3.6$  кВт). При данной температуре давление и концентрация атомов меди составляют 0.85 мм рт. ст. и  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> соответственно [49]. Таким образом, двукратное сжатие импульсов возбуждения приводит в режиме генерации к увеличению мощности излучения в 1.8 раза (при  $p_{Ne} = 150$  мм рт. ст. и  $C_s = 2200$  пФ) и КПД от выпрямителя – в 1.4 раза. При этом мощности излучения на отдельных длинах волн (кривые 2 и 3) становятся не только максимальными, но и примерно равными. Срыву генерации на зеленой линии (кривая 2) соответствует температура  $T = 1750$  °С, на желтой –  $T = 1800$  °С.

### 3.3. Зависимости мощности излучения и КПД от потребляемой мощности в режиме генерации

Для оценки возможности дальнейшего повышения КПД снималась зависимость «мгновенной» средней мощности излучения  $P_{rad}$  от потребляемой мощности при постоянной температуре разрядного канала со схемой возбуждения рис.3,б. Сущность эксперимента заключалась в резком изменении мощности выпрямителя при удалении от оптимальной рабочей точки ( $P_{rec} = 3.6$  кВт,  $T = 1630$  °С,  $P_{rad} = 37$  Вт) посредством регулировки напряжения с последующей фиксацией мощности излучения.

При уменьшении мощности выпрямителя от оптимальной мощности  $P_{rec} = 3.6$  кВт мощность излучения падает, в то время как КПД возрастает, достигая максимального значения 1.8 % при  $P_{rec} = 1$  кВт. При мощностях выпрямителя выше оптимальных КПД снижается. Последнее связано, в первую очередь, с уменьшением мощности излучения из-за «перегрева» активной среды и, во-вторых, с нелинейным ростом потерь мощности в тиратроне. Из результатов данного эксперимента следует, что увеличение КПД при потребляемых мощностях, меньших оптимальной, достигается при условии сохранения высокой температуры разрядного канала, т. е. высокой концентрации паров меди. Для обеспечения высокой температуры канала при относительно малых мощностях необходимо либо усиление теплоизоляции АЭ, либо введение дополнительного «косвенного» подогре-

ва. Эти выводы были подтверждены на АЭ с усиленной теплоизоляцией, КПД которого в оптимальном тепловом режиме ( $P_{rec} = 2$  кВт) составляет 1.2–1.3 %.

Для более полной оценки эффективности лазера определялся КПД по мощности  $P_{ac}$ , вводимой в АЭ. Для этого были проведены калориметрические измерения потерь мощности в тиратроне и в магнитоэлектрических звеньях. При возбуждении по схеме рис.3,а максимальный КПД в оптимальном стационарном тепловом режиме ( $T = 1550$  °С) составил  $\sim 1.1\%$  ( $P_{ac} = 1.8$  кВт), в переходном режиме – примерно 1.2 % ( $P_{ac} = 1.4$  кВт), при возбуждении по схеме рис.3,б – 1.8 % ( $P_{ac} = 2.0$  кВт) и 2.9 % ( $P_{ac} = 0.7$  кВт) соответственно.

### 3.4. Мощности излучения и физический КПД в режиме усиления

При использовании исследуемого АЭ в качестве усилителя мощности излучения в системе «задающий генератор – пространственный фильтр – усилитель мощности» мощность и физический КПД (КПД по мощности, вводимой в АЭ) увеличиваются по сравнению с режимом генерации по схеме рис.3,а с 20 до 23 Вт и с 1.1 до 1.2 %, а по сравнению с режимом генерации по схеме рис.3,б – с 37 до 46.5 Вт и с 1.8 до 2.3 % соответственно. Таким образом, двукратное сжатие импульсов возбуждения, вызвавшее увеличение концентрации атомов меди в 2.5 раза (за счет увеличения рабочей температуры с 1550 до 1630 °С), привело к двукратному увеличению мощности излучения (46.5 Вт/23 Вт  $\approx 2$ ) и КПД АЭ (2.33 %/1.24 %  $\approx 2$ ). Максимальный физический КПД, равный 3.5 %, был достигнут в переходном режиме при возбуждении по схеме рис.3,б.

### 3.5. Зависимость мощности излучения от давления буферного газа неона для АЭ «Кристалл» LT-30Cu

Зависимость мощности излучения от давления неона для АЭ «Кристалл» LT-30Cu (рис.5) получена при оптимальной потребляемой мощности ( $P_{rec} = 3.3$  кВт,  $f = 10.5$  кГц). При изменении давления от 100 до 760 мм рт. ст. (до атмосферного) суммарная мощность излучения снижалась с 33 до 21.5 Вт (на  $\sim 35\%$ ), мощность на зеленой линии – с 17 до 8.5 Вт (на  $\sim 50\%$ ) и на желтой линии – с 16 до 13 Вт (на  $\sim 19\%$ ). Таким образом, снижение суммарной

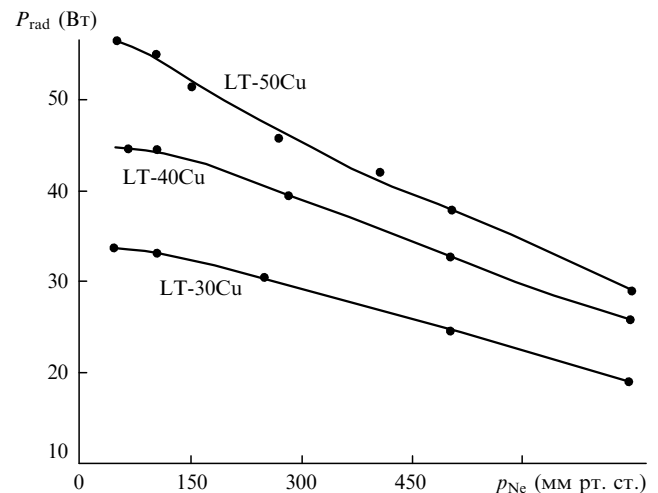


Рис.5. Зависимости суммарной средней мощности излучения АЭ «Кристалл» LT-30Cu, LT-40Cu и LT-50Cu от давления неона при потребляемых от выпрямителя мощностях соответственно 3.2, 4.0 и 5.5 кВт и  $f = 10.5$  кГц.

мощности излучения связано, в основном, со снижением мощности на зеленой линии генерации. С увеличением давления ухудшались характеристики импульсов накачки (увеличивались длительности импульсов напряжения и тока) и имело место контрагирование разряда. Очевидно, что для дальнейшего повышения эффективности АЭ при высоких давлениях необходимо не только формирование более коротких импульсов накачки с высоким напряжением, но и обеспечение относительно равномерного распределения температуры и плотности тока разряда по сечению разрядного канала. Экспериментально полученные результаты и приведенные выше выводы свидетельствуют о возможности обеспечения стабильной работы ЛПМ при давлениях, близких к атмосферному, и мощностях порядка десятков ватт. Наличие высокого рабочего давления буферного газа – один из основных способов повышения срока службы отпаянного АЭ.

С целью дальнейшего повышения мощности излучения лазера были проведены исследования АЭ с большим объемом активной (рабочей) среды:  $V = 350$  и  $900$  см<sup>3</sup>.

### 3.6. Конструктивные особенности и основные параметры АЭ «Кристалл» LT-40Cu и LT-50Cu

АЭ «Кристалл» LT-40Cu с  $V = 350$  см<sup>3</sup> конструктивно отличается от АЭ «Кристалл» LT-30Cu лишь удлинением на 30 см разрядным каналом (см. рис.1). АЭ «Кристалл» LT-50Cu с  $V = 900$  см<sup>3</sup> имеет такие же габариты, как и «Кристалл» LT-40Cu и в 1.6 раза больший диаметр разрядного канала (32 мм). Возбуждение АЭ осуществлялось от источника питания по схеме, показанной на рис.3,б. Достигнутые средние мощности излучения лазера с плоскосферическим резонатором (радиус кривизны глухого зеркала 3.5 м) при КПД по мощности от выпрямителя около 1 % для АЭ «Кристалл» LT-40Cu составили 40–44 Вт, для АЭ «Кристалл» LT-50Cu – 50–55 Вт, а мощность в режиме усилителя равнялась 55–60 Вт и 65–70 Вт соответственно (табл.2).

### 3.7. Зависимость мощности излучения от давления буферного газа неона для АЭ «Кристалл» LT-40Cu и LT-50Cu

На рис.5 для этих АЭ представлены зависимости суммарной средней мощности излучения от давления неона. При изменении давления от 50 до 760 мм рт. ст. мощность излучения для АЭ «Кристалл» LT-30Cu уменьшилась на ~35 %, LT-40Cu – на ~43 %, LT-50Cu – на ~48 %. Снижение суммарной мощности излучения связано, в первую очередь, со снижением мощности на зеленой линии. Из сравнительного анализа хода кривых следует, что с удлинением разрядного канала и увеличением его диаметра, т.е. объема активной среды, относительный спад мощности становится резче. В связи с этим, как правило, АЭ с большими объемами имеют меньшие рабочие давления. Если в АЭ «Кристалл» LT-30Cu выбранное рабочее давление составляет 250 мм рт. ст., то в АЭ «Кристалл» LT-50Cu оно равно 100–150 мм рт. ст. (см. табл.1 и 2).

### 3.8. Зависимость мощности излучения от частоты следования импульсов

Частотные характеристики АЭ (рис.6) снимались при возбуждении по схеме рис.3,б. При увеличении частоты следования импульсов от 10.5 до 20.5 кГц мощность излучения АЭ «Кристалл» LT-40Cu (кривая 1 на рис.6) сни-

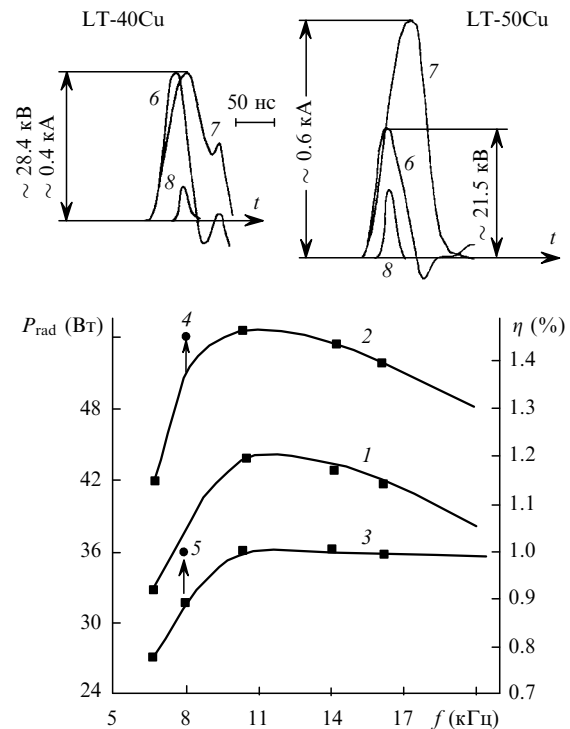


Рис.6. Зависимости суммарной средней мощности излучения АЭ «Кристалл» LT-40Cu (1) и LT-50Cu (2) и КПД  $\eta$  (по мощности, потребляемой от выпрямителя) (3) от частоты следования импульсов, а также осциллограммы импульсов напряжения (6), тока разряда (7) и излучения (8) АЭ «Кристалл» LT-40Cu и LT-50Cu при частоте  $f = 10.5$  кГц; точки 4 и 5 оптимизированы при  $C_s = 1500 + 1500$  пФ.

зилась на ~14 % при сохранении КПД около 1 %, а мощность АЭ «Кристалл» LT-50Cu – на 13 % также при сохранении КПД около 1 %. При уменьшении частоты имело место резкое снижение мощности излучения, что объясняется увеличением потерь мощности в тиратроне (из-за возрастания анодного напряжения), уменьшением доли мощности, идущей на разогрев АЭ, и соответствующим снижением температуры разрядного канала. При снижении частоты с 10.5 до 6 кГц мощности АЭ «Кристалл» LT-40Cu и LT-50Cu уменьшились на 24 %, а КПД – с 1 до 0.75 %. При замене емкости накопительного конденсатора  $C_s = 1000$  пФ + 1000 пФ = 2000 пФ и обстрельной емкости  $C_{peak} = 235$  пФ на 1500 пФ + 1500 пФ = 3000 пФ и 300 пФ соответственно при частоте повторения  $f = 8$  кГц были получены практически те же мощности излучения и КПД (см. точки 4 и 5 на рис.6), что и при  $f = 10.5$  кГц.

### 3.9. Результаты испытаний АЭ «Кристалл» LT-40Cu с ламповым источником питания

Проанализируем теперь результаты испытаний АЭ «Кристалл» LT-40Cu с ламповым источником питания (коммутатор – модуляторная лампа ГМИ-29А), разработанным фирмой «Алтек» (Москва). Этот источник позволяет формировать импульсы накачки длительностью 40–70 нс в широком диапазоне их частот повторения и обладает высокой эксплуатационной надежностью. Без специального отбора было взято 10 серийных приборов из разных партий, которые испытывались при одной и той же частоте повторения  $f = 12$  кГц.

Разброс по оптимизированной потребляемой мощности и мощности излучения получился минимальным:

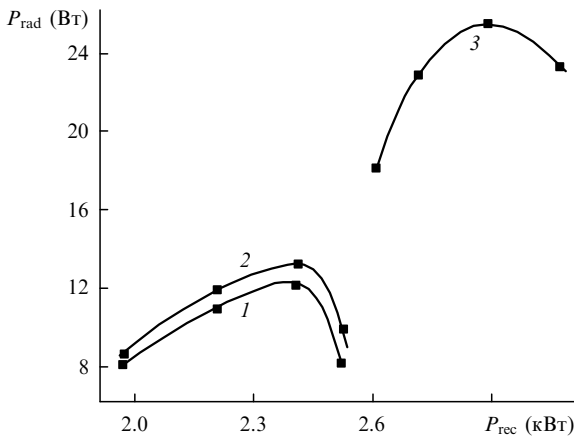


Рис.7. Зависимости суммарной средней мощности излучения сохраняемого АЭ на парах меди ГЛ-201 от мощности, потребляемой от выпрямителя, полученные в 1982 (1) и 1998 гг. (2, 3).

$\Delta P_{use} = 150$  Вт (3.6%),  $\Delta P_{rad} = 2$  Вт (4.2%). Использовался плоскосферический резонатор с радиусом кривизны глухого зеркала 3.5 м. Мощность излучения, полученная с ламповым источником питания, в 1.2 раза выше мощности излучения, полученной с тиратронным источником (48 Вт/40 Вт = 1.2).

### 3.10. Срок сохраняемости АЭ

Важным параметром надежности АЭ является срок сохраняемости. Гарантированный срок сохраняемости отпаянных промышленных АЭ составляет не менее 5 лет. В 1982 г. в лабораторных условиях были заложены на проверку сохраняемости два АЭ серии «Кристалл» с металлокерамической оболочкой. За 16 лет хранения разгерметизации приборов не произошло и чистота газа сохранилась. Параметры АЭ полностью воспроизвелись в 1998 г. Об этом свидетельствуют кривые 1 и 2 на рис.7, отражающие зависимость мощности излучения от мощности, потребляемой от выпрямителя при частоте следования импульсов 8 кГц. Схема возбуждения типа изображенной на рис.3,а имела емкости накопительного и обострительного конденсаторов 2200 и 470 пФ соответственно. Кривая 1 снята в 1982 г., кривая 2 – в 1998 г. Разница в мощности излучения на 1 Вт при оптимальной потребляемой мощности 2.35 кВт, вероятно, связана с разбросом характеристик, используемых в разное время тиратронов типа ТГИ1-2000/35. Кривая 3 снята в 1998 г. при возбуждении по схеме рис.3,б и  $f = 10.5$  кГц. Ход кривой показывает, что удвоение напряжения импульса накачки и его сжатие по длительности в 2 раза приводят к двукратному увеличению мощности излучения.

### 4. Зависимости удельных характеристик АЭ от объема активной среды

Приведенные в табл.1 и 2 мощности излучения для промышленных отпаянных АЭ серии «Кулон» и «Кристалл» являются результатом оптимизации электрических параметров схемы накачки при рабочем давлении неона в АЭ. При выборе давления буферного газа учитывалась не только выходная мощность, но и срок службы АЭ. Для всех АЭ на парах меди (кроме «Кристалл» LT-50Cu) гарантированный срок службы (минимальная наработка) составляет не менее 1000 ч. Гарантированная наработка АЭ «Кристалл» LT-50Cu пока равна 500 ч,

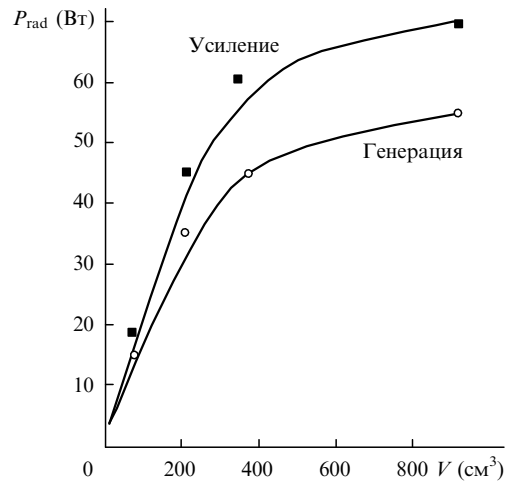


Рис.8. Зависимости суммарной средней мощности излучения АЭ на парах меди в режиме генерации и усиления от объема активной среды.

хотя запаса активного вещества достаточно для обеспечения в 3–4 раза большего срока службы. Это ограничение связано с отсутствием достаточного объема статистических данных по сроку службы.

На базе АЭ «Кристалл» LT-50Cu был изготовлен и частично исследован макет с большей на 30 см длиной разрядного канала (межэлектродное расстояние ~150 см,  $V = 1200$  см<sup>3</sup>). Мощность излучения в режиме генерации с плоскосферическим резонатором (радиус кривизны глухого зеркала 3.5 м) составила около 60 Вт, в режиме усиления – 80 Вт.

На основе данных табл.1 и 2 на рис.8 и 9 представлены зависимости характеристик излучения от объема активной среды АЭ. Эти зависимости определяют возможную перспективу и пути повышения эффективности АЭ с большим объемом активной среды. На рис.8 приведены кривые, соответствующие мощности излучения в режиме генерации и усиления. При изменении объема активной среды от 4–5 см<sup>3</sup> («Кулон» LT-1Cu и LT-1.5Cu) до ~900 см<sup>3</sup> («Кристалл» LT-50Cu) мощность излучения в режи-

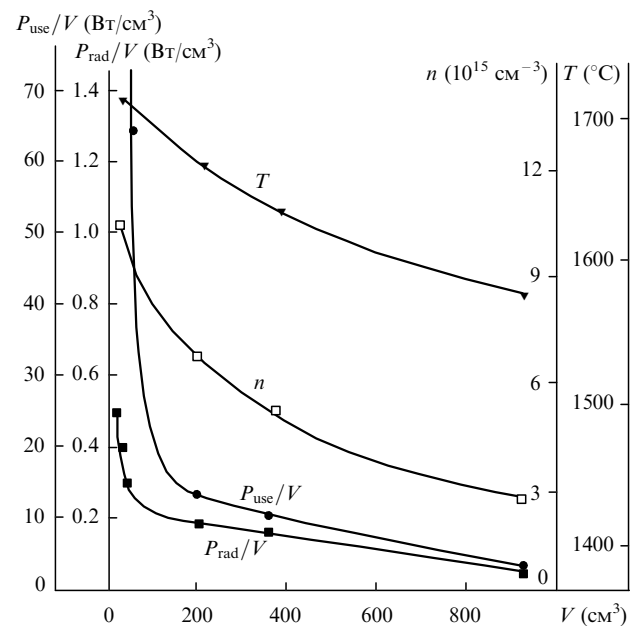


Рис.9. Зависимости удельного сьема мощности с АЭ  $P_{rad}/V$  и удельной потребляемой им мощности  $P_{use}/V$ , температуры разрядного канала  $T$  и концентрации атомов меди  $n$  от объема активной среды.

ме генерации возросла с  $\sim 1.5$  до 55 Вт, в режиме усиления – до 70 Вт. Если объем увеличился в  $\sim 225$  раз ( $900 \text{ см}^3/4 \text{ см}^3$ ), то мощность излучения – только в 47 раз ( $70 \text{ Вт}/1.5 \text{ Вт}$ ), т. е. примерно в 5 раз меньше. На основе данных по мощности излучения в режиме усиления и мощности, вводимой в АЭ, построены зависимости удельного сьема мощности  $P_{\text{rad}}/V$  и удельной вводимой мощности  $P_{\text{use}}/V$  от объема активной среды АЭ. Если в АЭ «Кулон» с  $V \approx 4 \text{ см}^3$  удельный сьем мощности достигает  $\sim 0.5 \text{ Вт}/\text{см}^3$ , то в АЭ «Кристалл» с  $V = 900 \text{ см}^3$  он составляет  $0.08 \text{ Вт}/\text{см}^3$ , что примерно в 5 раз меньше. Это свидетельствует о потенциальной возможности получения на приборе типа «Кристалл» LT-50Cu (диаметр разрядного канала 32 мм) мощности до сотен ватт.

Для подтверждения этой возможности на рис.9 были дополнительно построены зависимости температуры стенки разрядного канала, где расположено активное вещество – медь, и концентрации атомов меди от объема активной среды АЭ. С одной стороны, кривая  $P_{\text{use}}$  свидетельствует о необходимости введения в активную среду АЭ небольшого объема удельной мощности до  $100 \text{ Вт}/\text{см}^3$ . Но, с другой стороны, столь высокая удельная (вводимая) мощность для АЭ с большим диаметром является избыточной, т. к. в нашем случае уже при удельной мощности свыше  $4 \text{ Вт}/\text{см}^3$  происходит снижение мощности излучения из-за перегрева активной среды. В АЭ «Кулон» с  $V = 4 \text{ см}^3$  рабочая температура разрядного канала  $T \sim 1700^\circ\text{C}$ , что соответствует концентрации атомов меди  $n \sim 1.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  [49], в АЭ «Кристалл» с  $V = 900 \text{ см}^3$  температура  $T = 1570^\circ\text{C}$ , концентрация  $n \sim 2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , т. е. примерно в 5 раз меньше (кривые  $T$  и  $n$  на рис.9).

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что между концентрацией паров меди и удельной мощностью существует прямо пропорциональная зависимость. Следовательно, для достижения высокой эффективности работы АЭ с большим объемом необходима такая конструкция лазера, которая обеспечивала бы рабочую температуру разрядного канала до  $1700^\circ\text{C}$  без перегрева активной среды.

Для обобщающей оценки эффективности работы

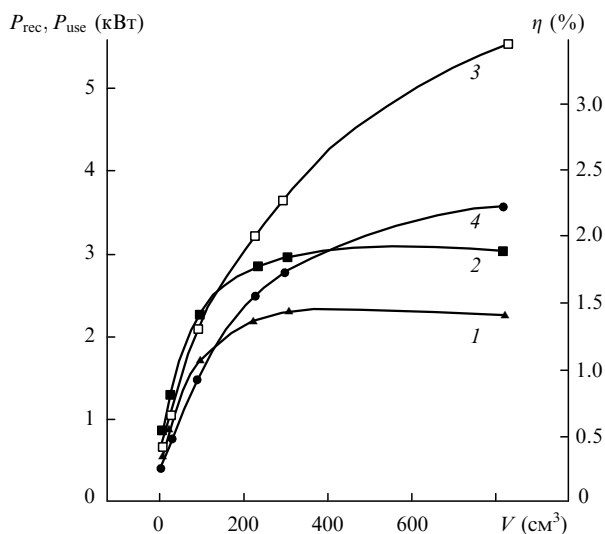


Рис.10. Зависимости КПД по мощности, потребляемой от выпрямителя (1), КПД по мощности, вводимой в АЭ (2), а также мощности  $P_{\text{rec}}$ , потребляемой от выпрямителя (3), и мощности  $P_{\text{use}}$ , вводимой в АЭ (4), от объема активной среды ЛПМ.

промышленных отпаянных АЭ на парах меди (см. табл. 1 и 2) были построены зависимости КПД по мощности, потребляемой от выпрямителя (кривая 1 на рис.10) и по мощности, вводимой в АЭ (кривая 2), от объема активной среды. При расчете КПД брались мощности в режиме усиления АЭ. Это важно, в первую очередь, для АЭ серии «Кристалл», т. к. они используются в основном в многомодульных системах для формирования мощных пучков. Мощность излучения в режиме усиления примерно в 1.3–1.4 раза выше, чем в режиме генерации. И, как видно из хода кривых 1 и 2, для АЭ «Кристалл» КПД от выпрямителя составляет  $\sim 1.5\%$ , КПД по вводимой в АЭ мощности – примерно  $2\%$ .

## 5. АЭ на парах золота

Базовыми конструкциями для АЭ на парах золота ( $\lambda = 0.628 \text{ мкм}$ ) являются АЭ на парах меди, в которые в качестве активного вещества вместо меди закладывается золото. При этом оптимальная температура возрастает на  $100\text{--}150^\circ\text{C}$  (до  $1800^\circ\text{C}$ ). Для АЭ «Кулон» LT-1Au базовой конструкцией является АЭ «Кулон» LT-5Cu, для АЭ «Кулон» LT-1.5Au – «Кулон» LT-10Cu, для АЭ «Кристалл» LT-4Au – «Кристалл» LT-30Cu. Мощность излучения лазера на парах золота для каждой из указанных конструкций примерно в 6 раз меньше мощности ЛПМ.

На рис.11 приведены зависимости суммарной средней мощности излучения (кривая 1), температуры разрядного канала (кривая 2), КПД по мощности, потребляемой от выпрямителя (кривая 3), и КПД по мощности, вводимой в АЭ (кривая 4), от потребляемой от выпрямителя мощности для АЭ «Кристалл» LT-4Au. Использовалась схема возбуждения с емкостным удвоением напряжения и магнитным звеном сжатия (см. рис.3,б), частота следования импульсов составляла  $16 \text{ кГц}$ , давление неона –  $250 \text{ мм рт. ст.}$  Максимальная мощность излучения достигалась при температуре стенки разрядного канала, близкой к  $1800^\circ\text{C}$ .

При этом КПД по мощности, потребляемой от выпрямителя, составляет  $\sim 0.15\%$ , а КПД по мощности, вводимой в АЭ, – примерно  $0.3\%$ . При изменении дав-

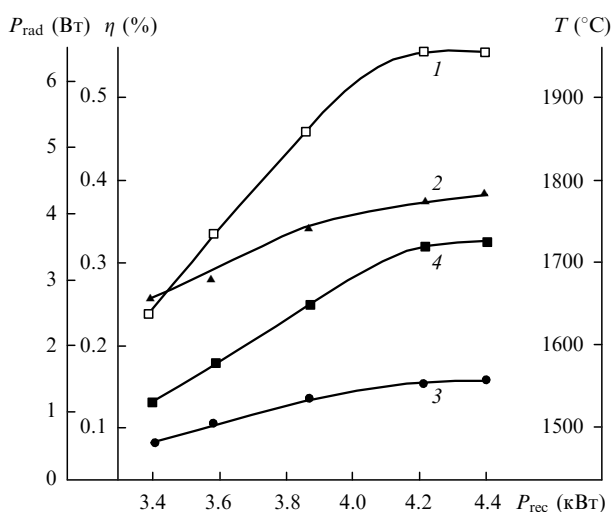


Рис.11. Зависимости суммарной средней мощности излучения (1), температуры разрядного канала (2), КПД по мощности, потребляемой от выпрямителя (3), и КПД по мощности, вводимой в АЭ (4), от мощности, потребляемой от выпрямителя, для АЭ «Кристалл» LT-4Au.



Табл.4. Основные параметры зарубежных аналогов ЛПМ.

Модель	Страна, фирма	Исполнение	$d_{out}$ (мм)	$f$ (кГц)	$P_{rad}$ (Вт)	$P_{510.6}:P_{578.2}$	Гарантируемая мини-	$P_{rec}$ (кВт)	$P_n$ (кВт)
							мальная наработка (ч)		
							Технический ресурс АЭ (ч)		
«Кристалл» LT-30Cu	Россия, ГНПП «Исток»	отпаянное	20	$11 \pm 1$	30–2	1:1	1000 $\geq 2000$	2.9 –	3.1 –
CVL-30	Израиль, Nuclear Research Center	с частичной прокачкой	30	5.2	$30 \pm 5$	$> 1.2:1$	400* –	– 5	– –
«Кристалл» LT-40Cu	Россия, ГНПП «Исток»	отпаянное	20	$11 \pm 1$	39–41	1:1	1000 $\geq 2000$	3.6 –	3.9 –
AGL-45	Англия, Oxford Lasers	прокачное	42	6	45	$< 1.7:1$	$> 300^*$ –	– 6	– –
«Кулон» LT-5Cu	Россия, ГНПП «Исток»	отпаянное	14	12–18	5–9	$< 1.5:1$	1000 $\geq 2000$	1.2 –	1.5 –
SCuL05H	Болгария, Mashinexport	отпаянное	15	5–15	7	–	– 1000	– –	– –
CVL-5W	США, Lasers Now	отпаянное	14	20	5	1.4:1	– $\geq 800$	– 1.2	– –
«Кулон» LT-10Cu	Россия, ГНПП «Исток»	отпаянное	14	14–17	10–15	$< 1.5:1$	1000 $\geq 2000$	1.5 –	1.8 –
CU10-A	Англия, Oxford Lasers	прокачное	25	8–14	10	2:1	$> 300^*$ –	– –	– –
SCuL10H	Болгария, Mashinexport	отпаянное	25	5–15	10–12	–	– 500	– –	– –
CVL-10W	США, Lasers Now	–	20	20	10	–	– $> 500$	– –	– –
CVL-10	Израиль, Nuclear Research Center	отпаянное	20	–	10	–	– 1000	– –	– –

\*Время работы на одной загрузке меди.

Примечания:  $d_{out}$  – диаметр выходного пучка;  $P_n$  – потребляемая мощность от сети.

ления от 150 до 760 мм рт. ст. мощность снизилась с 6.7 до 5.4 Вт (на  $\sim 19\%$ ), а КПД по мощности, вводимой в АЭ, – с 0.32 до 0.25 %. При увеличении частоты следования импульсов спад мощности излучения с изменением давления становится более резким, например при частоте 21.5 кГц мощность снизилась уже на 41 %. При увеличении частоты с 10.5 до 21.5 кГц мощность излучения снизилась с 6.3 до 4.6 Вт (на  $\sim 27\%$ ). Давление неона в АЭ составляло 250 мм рт. ст., максимальная мощность, полученная после оптимизации условий возбуждения при давлении неона 50 мм рт. ст., – 8.5 Вт.

Для АЭ «Кулон» LT-1Au изменение давления неона от 200 до 600 мм рт. ст. привело к двукратному уменьшению мощности (1.5 Вт/0.75 Вт = 2). Полученные результаты показывают, что лазер на парах золота достаточно эффективно работает при близких к атмосферному давлении неона, при которых обеспечивается долговечность не менее 1000 ч.

## 6. Сравнительный анализ эффективности отечественных отпаянных лазеров и их зарубежных аналогов

Для оценки эффективности отечественных коммерческих отпаянных ЛПМ серий «Кристалл» и «Кулон» в табл.4 приведены основные параметры близких по мощ-

ности излучения зарубежных аналогов.

Из табл.4 следует, что отечественный АЭ «Кристалл» LT-30Cu имеет такую же мощность излучения, как и израильская модель АЭ CVL-30 [50]. Если судить по диаметру разрядного канала АЭ CVL-30, то можно предположить, что объем его активной среды в  $\sim 2$  раза больше, а эффективность (съем мощности с единицы объема) во столько же раз меньше, чем у модели «Кристалл» LT-30Cu. Эффективность английской модели АЭ AGL-45 [51] в  $\sim 4$  раза ниже, чем у АЭ «Кристалл» LT-40Cu. Зарубежные аналоги мощностью более 10 Вт работают, в основном, в режиме непрерывной прокачки буферного газа, т.е. лазер снабжен дополнительными элементами жизнеобеспечения. К тому же через определенные интервалы наработки (300 и 400 ч) производится перезакладка меди. Таким образом, отечественные приборы серии «Кристалл» выгодно отличаются от зарубежных приборов с такой же мощностью не только эффективностью, но и отпаянным исполнением. Последнее повышает надежность лазера в целом и упрощает его эксплуатацию.

Приборы серии «Кулон» также более предпочтительны, чем зарубежные аналоги. Например, эффективность АЭ «Кулон» LT-10Cu в  $\sim 2$  раза выше, чем у моделей CVL-10W (США) [52] и CVL-10 (Израиль) [50], и в  $\sim 3$  раза выше, чем у моделей CU10-A (Англия) (см. [8], с.459–462) и SCuL10H (Болгария) [53]. Лазер CU10-A фирмы Oxford



Рис.12. Лазер на парах меди «Курс» ЛГИ-202.

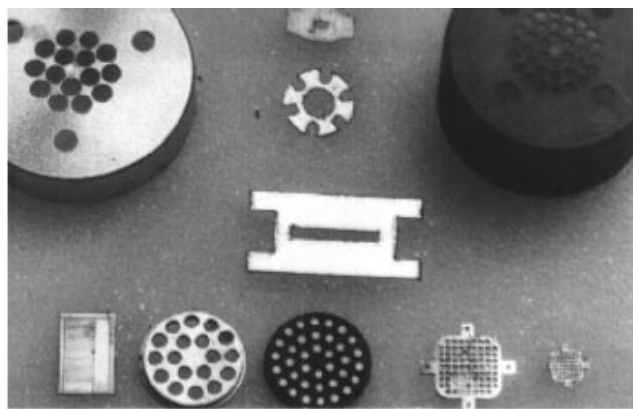


Рис.14. Образцы деталей, изготовленные на автоматической лазерной технологической установке «Каравелла».

Lasers работает с прокачкой неона. Время работы его АЭ на одной загрузке меди составляет  $\sim 300$  ч. Лазеры SCuL05H и SCuL10H фирмы Mashinoexport изготавливаются как в прокачном, так и в отпаянном исполнении. Для отпаянных АЭ зарубежных лазеров мощностью 5–10 Вт в качестве основного параметра надежности, как видно из табл.4, приводится технический ресурс (500–1000 ч), который не превышает минимальный (гарантированный) ресурс АЭ, разработанного в ГНПП «Исток».

Самый мощный российский промышленный АЭ – «Кристалл» LT-50Cu. В зарубежных странах (США, Франция, Япония и др.) в связи с выполнением программы AVLIS (лазерное разделение изотопов) разработаны прокачные АЭ со средней мощностью излучения 100–750 Вт. С отдельного АЭ в режиме усиления в Ливерморской национальной лаборатории (США) в 1991 г. получена мощность излучения более 750 Вт, во французской фирме CILAS – 400 Вт (1996 г.), в японской фирме Toshiba – 615 Вт (1995 г.) [8, 9].

## 7. Излучатели, лазеры и лазерные установки

Исследования характеристик ЛПМ, проведенные в [38–44, 54–59], явились основой для разработки и производства в ГНПП «Исток» высокоэффективных и надежных излучателей типа «Карелия» ИЛГИ-201 и «Клен» ИЛГИ-202 (1989 г.), а также «Кулон», лазерной установки «Курс» ЛГИ-202 (1990 г.) [60, 61] (рис.12), медицинских установок «Янтарь», «Яхрома» и «Кулон» [62–68] и автоматизированной лазерной технологической установки «Каравелла» [69–71], оптическая схема которой приведена на рис.13. «Каравелла» предназначена для прецизионной обработки материалов (некоторые образцы представлены на рис.14) и в ряде случаев представляется более предпочтительной [72], чем аналогичные установки на основе твердотельных лазеров [71].

В последнее время разрабатывается и внедряется новое поколение малогабаритных ЛПМ-установок различного назначения.

## 8. Лазерная система генератор – усилитель с двумя усилителями

Нами был исследован лазер с модернизированным излучателем «Карелия» ИЛГИ-201, в котором для повышения мощности излучения использовались два АЭ «Кристалл» LT-50Cu в качестве усилителей мощности. В

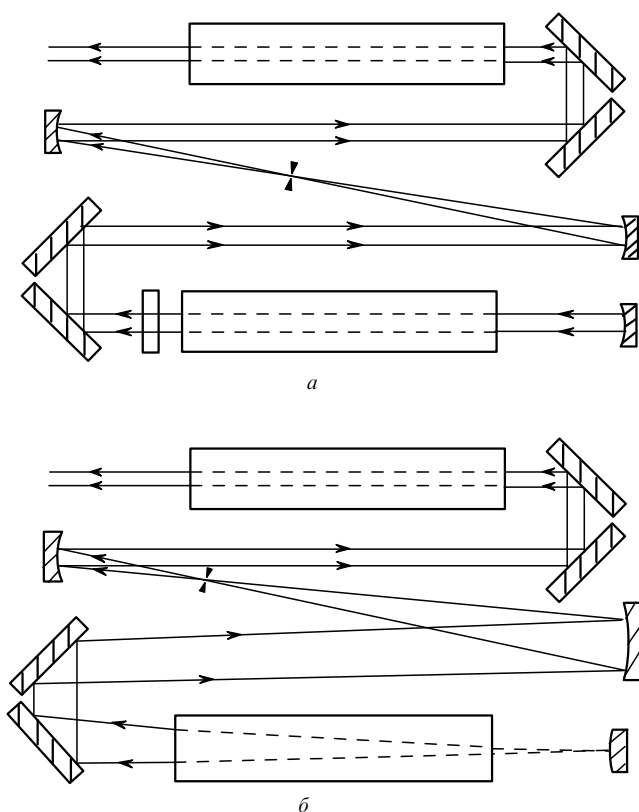


Рис.13. Оптические схемы излучателя ЛПМ «Карелия» с телескопическим резонатором (а) и с одним зеркалом (б).

качестве задающего генератора применялся АЭ «Кулон» с мощностью излучения 3–4 Вт (диаметр разрядного канала  $d = 12$  мм). Задающий генератор с телескопическим резонатором и пространственным фильтром-коллиматором компактно располагался между усилителями мощности. Мощность лазерной системы составила 105 Вт при  $f = 10$  кГц и расходимости 0.3 мрад, пиковая мощность была равна  $\sim 500$  кВт, энергия в импульсе – примерно 10 мДж. В этой системе не было достигнуто временное согласование, т. к. задающий генератор с АЭ «Кулон» имел длительность импульса излучения  $\tau = 15 - 20$  нс, а длительность импульса АЭ «Кристалл» LT-50Cu составляла 30–35 нс. При использовании в качестве генератора АЭ «Кристалл» LT-30Cu с  $\tau \approx 30$  нс съем мощности с одного АЭ «Кристалл» LT-50Cu равнялся 70 Вт.

## Заключение

В результате многолетних комплексных физических исследований впервые был создан целый класс малогабаритных эффективных лазерных АЭ с рядом рекордных характеристик. Проведенные исследования показали, что разработанные коммерческие промышленные отпаянные АЭ «Кулон» и «Кристалл» со средней мощностью излучения 1–15 Вт и 30–50 Вт в режиме генерации имеют практический КПД 0.2–0.8 % и 1.0–1.2 % соответственно. Физический КПД для АЭ «Кристалл» составляет 1.5–1.8 % в режиме генерации и 2.3–3 % – в режиме усиления. КПД АЭ с увеличением диаметра и длины разрядного канала, т. е. объема активной среды, возрастает, удельные снимаемая и вводимая мощности, а также температура разрядного канала снижаются.

Увеличение активного объема от 4.2 см<sup>3</sup> («Кулон» LT-1Cu) до 900 см<sup>3</sup> («Кристалл» LT-50Cu) приводит к снижению рабочей температуры разрядного канала от 1700 до 1570 °С, что соответствует уменьшению в 4–5 раз концентрации меди и во столько же раз – удельного съема мощности. Для повышения эффективности АЭ с большим объемом его конструкция, состав газовой среды и условия возбуждения должны быть оптимизированы для работы при концентрации паров меди, близкой к 10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> ( $T > 1600$  °С).

Отпаянные АЭ серий «Кулон» и «Кристалл» по эффективности, гарантированной наработке и условиям эксплуатации предпочтительнее близких к ним зарубежных аналогов. По сравнению с последними эффективность, а также съем мощности с единицы объема АЭ «Кулон» и «Кристалл» в 2–4 раза выше, минимальная наработка почти в 3 раза больше, а отпаянность исполнения АЭ позволяет обойтись без дополнительных элементов жизнеобеспечения.

Первые разработанные излучатели «Клен» и «Карелия», лазеры «Курс», двухканальные лазеры, а также созданные на их основе медицинские установки «Янтарь», «Яхрома» и технологическая установка «Каравелла» являются основой для разработки нового поколения эффективных лазеров и лазерных установок.

1. Fowles G.R., Sulvast W.T. *Appl.Phys.Letts*, **6**, 236 (1965).
2. Piltch M., Walter W.T., Solimene N., Gould G., Bennet W.R. *Appl. Phys.Letts*, **7**, 309 (1965).
3. Walter W.T., Solimene N., Piltch M., Gould G. *Bull.Amer.Phys.Soc.*, **11**, 113 (1966).
4. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. А.с. СССР № 446239.

- Приоритет от 14.07.71.
5. Бурмакин В.А., Былкин В.И., Дорошкин А.А., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. А.с. СССР № 555776. Приоритет от 11.03.74.
6. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. *Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов* (Новосибирск, Наука, 1985, с.140).
7. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М., Научная книга, 1998, с.544).
8. Little C.E., Sabotinov N.V. *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Pulsed Metal Vapor Lasers Physic and Emerging Applications in Industry, Medicine and Sciency* (St. Andrews, UK, 1995; Dordrecht, Nato ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 1996).
9. Little C.E. *Metal Vapor Lasers Physics, Engineering and Application* (Chichester, John Willes & Sons, 1999).
10. Walter W.T., Solimene N., Piltch M., Gould G. *IEEE J.Quantum Electron.*, **2**, 474 (1966).
11. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **16**, 40 (1972).
12. Chen C.J., Nerheim N.M., Russell G.R. *Appl.Phys.Letts*, **23**, 514 (1973).
13. Елецкий А.В., Земцов Ю.К., Родин А.В., Старостин А.Н. *ДАН СССР*, **220**, 318 (1975).
14. Казарян М.А. *Канд. дис.* (М., ФИАН, 1974).
15. *Импульсный лазер на парах меди ЛПМИ-75 (реклама)* (М., Электроника, 1975).
16. Бурмакин В.А., Евтюнин А.Н., Лесной М.А., Былкин В.И. *Квантовая электроника*, **5**, 1000 (1978).
17. Беляев В.П., Зубов В.В., Лесной М.А., Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Воробьев О.Д. *Электронная промышленность*, № 5–6, 82 (1981).
18. Мишин В.А. *Докл. всерос. конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул»* (Звенигород, 1998, с.28).
19. Бохан П.А. *Докл. всерос. конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул»* (Звенигород, 1998, с.39).
20. Земсков К.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *УФН*, **126**, 695 (1978).
21. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **1**, 14 (1974).
22. Беляев В.П., Бурмакин В.А., Былкин В.И. и др. *Электронная промышленность*, № 5, 39 (1976).
23. Горбаренко В.А., Онухов Н.А., Скрипниченко А.С. *Электронная техника. Сер. Микроэлектроника*, **2**, 61 (1978).
24. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. *Оптические системы с усилителями яркости* (Горький, ИПФ АН СССР, 1988, с.173).
25. Земсков К.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 260 (1985).
26. Казарян М.А. *Докт. дис.* (М., ФИАН, 1989).
27. Васильев М.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Кузнецова Т.И. *Квантовая электроника*, **5**, 666 (1978).
28. Земсков К.И., Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **10**, 2278 (1983).
29. Бункин Ф.В., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. *ДАН СССР*, **243**, 1568 (1978).
30. Амбарцумян Р.В., Захаров С.Д., Земсков К.И. и др. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 8, 35 (1988).
31. Ivanov A.V., Kazaryan M.A. (Eds) *Laser use in oncology. Proc. SPIE*, **2787** (1996).
32. Пономарев И.В. *Лазеры на парах меди в медицине* (М., ФИАН, 1998).
33. Странадко Е.Ф. *Laser Market*, № 7–8, 22 (1993).
34. *Фотодинамическая терапия. Матер. III симп.* Под ред. Е.Ф. Странадко (М., Минздрав России, 1999).
35. Странадко Е.Ф., Маркичев И.А., Рябов М.В. В кн. *Фотодинамическая терапия в лечении злокачественных новообразований различных локализаций. Пособие для врачей* (М., Минздрав России, 1999).
36. Казарян М.А., Кружалов С.В., Лябин Н.А., Мокрушин Ю.М., Парфенов В.А., Прохоров А.М., Шакин О.В. *Квантовая электроника*, **25**, 773 (1998).
37. Евтушенко Г.Е. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **42**, № 8, 88 (1999).
38. Зубов В.В., Лябин Н.А., Мишин В.И., Мучник М.Л., Паршин Г.Д., Черняк Е.Я., Чурсин А.Д. *Квантовая электроника*, **10**, 1908

- (1983).
39. Беляев В.П., Зубов В.В., Исаев А.А., Лябин Н.А., Соболев Ю.Ф., Чурсин А.Д. *Квантовая электроника*, **12**, 74 (1985).
  40. Зубов В.В., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. *Квантовая электроника*, **13**, 2431 (1986).
  41. Зубов В.В., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. *Квантовая электроника*, **17**, 28 (1990).
  42. Zubov V.V., Chursin A.D., Lesnoy M., Ugolnikov S.A. *Proc.SPIE*, **2110**, 78 (1993).
  43. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Доманов М.С. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **42**, № 8, 67 (1999).
  44. Lyabin N.A., Zubov V.V., Koroleva M.E., Ugolnikov S.A. *J.Russ. Laser Res.*, **17**, 346 (1996).
  45. Технические условия КРПГ.433757.001-003ТУ. Элемент активный лазерный ГЛ-205А, ГЛ-205Б, ГЛ-205В, ГЛ-205Г (1998 г.)
  46. Технические условия КРПГ.433757.004-007ТУ. Элемент активный лазерный ГЛ-206А, ГЛ-206Б, ГЛ-206В, ГЛ-206Г, ГЛ-206Д, ГЛ-206Е, ГЛ-206Ж (1998 г.).
  47. Батыгин В.Н. В кн. *Детали из керамических материалов и лейкосапфира. Металлокерамические узлы* (ГНПП «Исток», Фрязино, 1976).
  48. Агеев В.П., Атежев В.В., Букреев В.С. и др. *ЖТФ*, **56**, 1387 (1986).
  49. Фогельсон Т.Б., Бреусова Л.Н., Вагин Л.Н. *Импульсные водородные тиратроны* (М., Сов. радио, 1971).
  50. Коваленко В.Ф. *Теплофизические процессы и электровакуумные приборы* (М., Сов. радио, 1975).
  51. *Copper vapor laser specifications (реклама)* (Negev, Nuclear Research Centre, 1996, с.1).
  52. *The advanced copper laser (реклама)* (Oxford Lasers, 1991, с. 15).
  53. *CVL 10 W laser specifications (реклама)* (USA, Lasers Now; <http://www.lasersnow.com>, 2000, с.1).
  54. Лазеры на парах меди и золота (реклама) (Болгария, «Машиноэкспорт», 1982).
  55. Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г. *Система генератор-усилитель на основе лазера на парах меди. Препринт ФИАН* (М., 1982).
  56. Беляев В.П., Зубов В.В., Чурсин А.Д. *Электронная промышленность*, №10, 28 (1984).
  57. Лябин Н.А. *Тез. докл. конф. «Импульсные газовые лазеры»* (М., ЦНИИЭ, 1986); *Электронная техника. Сер. 11 Лазерная техника и оптоэлектроника*, №3 (237), 15 (1986).
  58. Зубов В.В., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. *Квантовая электроника*, **15**, 1947 (1988).
  59. Лябин Н.А. *Квантовая электроника*, **16**, 652 (1989).
  60. Lyabin N.A., Chursin A.D., Ugolnikov S.A., Korolyova M.E., Kazaryan M.A. *Proc. Int. Conf. on Lasers'98* (Tucson, AZ, 1998; McLean, VA, STS Press, 1999, p. 359).
  61. Лябин Н.А., Зубов В.В., Угольников С.А. А.с. СССР № 1813307. Приоритет от 24.08.90.
  62. Чурсин А.Д. Патент РФ № 2023334. Приоритет от 15.11.94.
  63. Алейников В.С., Беляев В.П., Девятков Н.Д., Масычев В.И. *Электронная промышленность*, № 10, 5 (1984).
  64. Алейников В.С., Масычев В.И. *Электронная промышленность*, № 10, 12 (1984).
  65. Девятков Н.Д., Рабкин И.Х., Максимович И.В., Рогов К.А., Алейников В.С., Беляев В.П., Зубов В.В., Лябин Н.А. *Хирургия*, **4**, 116 (1986).
  66. Армицев А.В., Алейников В.С., Беляев В.П., Зубов В.В. *Матер. всесоюз. школы «Лазерная техника и ее применение в медицине»* (М., 1984, с.19).
  67. Армицев А.В., Алейников В.С., Лябин Н.А. *Матер. междунар. конф. «Перспективные направления лазерной медицины»* (М., 1992, с.440).
  68. Армицев А.В., Странацко Е.Ф., Соколов В.В., Рябов М.В., Лябин Н.А., Черный В.В. *Матер. междунар. конф. «Новые направления лазерной медицины»* (М., 1996, с.353).
  69. Армицев А.В., Алейников В.С., Доманов М.С., Лябин Н.А. *Матер. VIII междунар. научно-технич. конф. «Лазеры в науке, технике, медицине»* (Пушкинские Горы, 1997; М., 1997, с.18).
  70. Алейников В.С., Беляев В.П., Жариков В.М. и др. *Тез. докл. конф. «Импульсные газовые лазеры»* (М., ЦНИИЭ, 1986); *Электронная техника. Сер.11 Лазерная техника и оптоэлектроника*, № 5 (239), 21 (1986).
  71. Жариков В.М., Зубов В.В., Иванов Ю.Н. *Тез. докл. отраслевого научно-техн. сем. «Лазерная техника и технология»* (Брянск, 1991, с.66).
  72. Жариков В.М., Лябин Н.А., Доманов М.С., Казарян М.А. *Лазеринформ*, № 9 (168), 2 (1999).