

Н.А. Лябин

Промышленные отпаянные лазеры на парах меди типа «Кристалл» с повышенными КПД и мощностью излучения

Государственное научно-производственное предприятие «Исток», г. Фрязино, Московская область

Поступила в редакцию 27.01. 2000 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований по повышению КПД и мощности излучения промышленных импульсно-периодических лазеров на парах меди. За счет конструктивных, технологических и схемных решений КПД лазера в режиме генератора повышен по потребляемой мощности от выпрямителя до 1–1,2%, по мощности, вводимой в активный элемент, – до 1,4–1,6 %. Показана возможность повышения КПД до 1,8 и 2,9% соответственно. В режиме усилителя КПД и мощность в 1,2–1,3 раза выше (по сравнению с режимом генератора). Достигнутое значение съема мощности в режиме генератора с активного элемента «Кристалл LT-30 Cu» объемом активной (рабочей) среды 250 см³ составило 37 Вт, в режиме усилителя – 44 Вт, «Кристалл LT-40 Cu» объемом 350 см³ – 44 и 60 Вт, «Кристалл LT-50 Cu» объемом 900 см³ – 55 и 70 Вт соответственно.

Введение

Лазеры на парах металлов в настоящее время получили широкое применение в науке, технике и медицине. К их важнейшим практическим характеристикам относятся КПД, мощность и качество излучения. Самым эффективным и распространенным прибором из указанного класса является импульсный лазер на парах меди, работающий в видимой области спектра с длиной волны излучения 0,51 и 0,58 мкм.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований по повышению КПД и мощности излучения отпаянного саморазогревного импульсно-периодического лазера на парах меди при относительно высоких уровнях мощности накачки. Вопросы повышения КПД и мощности данного типа лазера посвящено достаточно большое количество работ [1–12]. Впервые экспериментально максимальное значение КПД (1%) было достигнуто в [2].

В зарубежных статьях сообщается о достаточно надежной работе мощных прокачных лазеров с КПД около 1% и выше при диаметрах разрядного канала 6–12 см [6, 7]. И авторы данных работ считают, что повышение мощности излучения за счет увеличения объема активной среды является с практической точки зрения наиболее эффективным способом.

Экспериментальная установка

В качестве базового активного элемента (АЭ) использован промышленный отпаянный саморазогревный АЭ ГЛ-201 с диаметром разрядного канала 2 см, межэлектродным расстоянием 93 см и объемом активной среды 250 см³ [8–10]. Модернизированный АЭ с такими же геометрическими размерами называется «Кристалл LT-30 Cu». Модернизация заключалась в совершенствовании конструкции и технологии его изготовления. Основная часть узлов, габаритные и присоединительные размеры АЭ и геометрические размеры разрядного канала остались неизменными. Такая модернизация привела при одинаковых условиях возбуждения к увеличению выходной мощности и КПД лазера примерно в 1,5 раза.

Разогрев и возбуждение АЭ осуществляли от импульсного источника питания на базе водоохлаждаемого водородного тиратрона ТГИ1-2000/35 [13]. Первая часть экспериментальных исследований была проведена с традиционной схемой исполнения модулятора (рис. 1, а), когда тиратрон, накопительный конденсатор и АЭ образуют единый разрядный контур [8, 9]. И поэтому в данном исполнении характеристики импульсов возбуждения определяются непосредственно параметрами тиратрона и, в зависимости от емкости конденсатора и частоты следования импульсов, общая длительность импульсов тока изменялась в пределах 200–350 нс. Для получения же более высоких мощностей и КПД необходимо уменьшить длительность до значений, близких к времени существования инверсии [8].

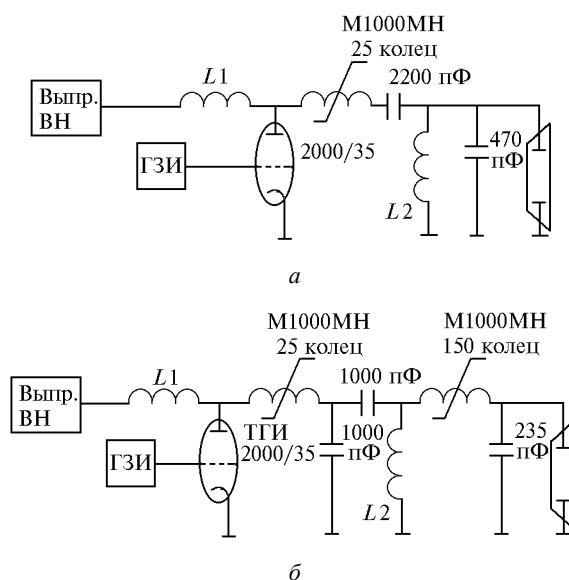


Рис. 1. Схемы исполнения импульсного источника питания

Во второй части исследований использовалась более эффективная схема возбуждения, а именно схема с емко-

стным удвоением напряжения и нелинейным насыщающимся дросселем в разрядной цепи в качестве магнитного звена сжатия (рис. 1,б) [14].

Использовался оптический резонатор плоскосферический с радиусом кривизны «глухого» зеркала 3 м ($\rho = 99\%$).

В процессе эксперимента производился контроль суммарной средней мощности излучения и мощности на отдельных длинах волн, температуры разрядного канала, потерь мощности на тиратроне с тирактором [13] и в звене сжатия импульса, снимались осциллограммы импульсов напряжения и тока накачки и излучения. Измерение мощности излучения проводилось с помощью преобразователя мощности ТИ-3 и милливольтметра типа М136, температуры разрядного канала – оптическим пирометром «Проминь». Для регистрации импульсов напряжения использовался компенсированный делитель напряжения, импульсов тока – пояс Роговского и осциллограф С1-75. Импульсы излучения фиксировались коаксиальным фотоэлементом ФЭК-14К и осциллографом С1-75. Потери мощности оценивались calorиметрически по нагреву и расходу охлаждающей воды.

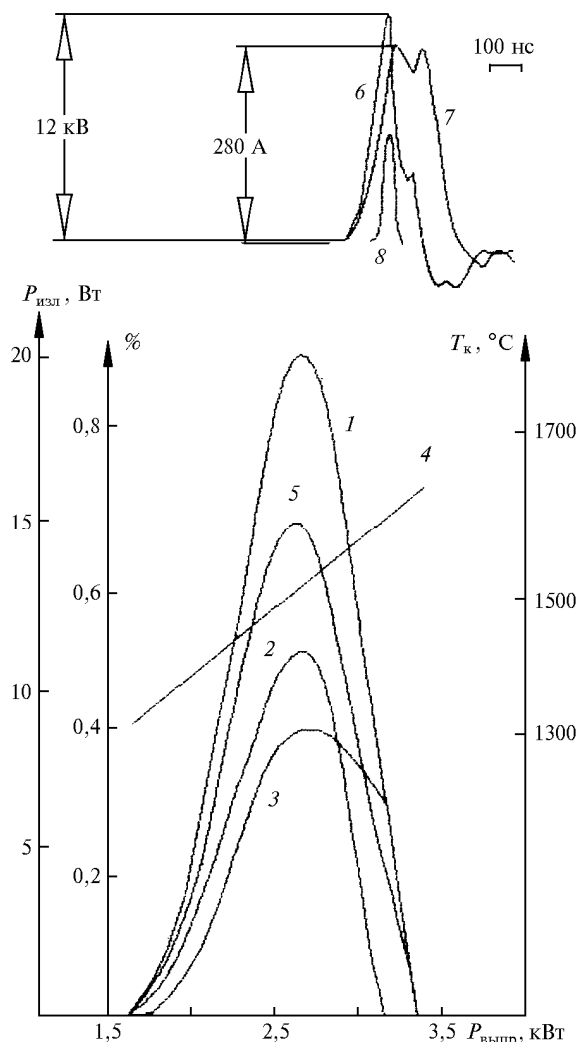


Рис. 2. Зависимости суммарной средней мощности излучения (1), мощности на отдельных длинах волн (2 – 0,51 мкм; 3 – 0,58 мкм), температуры разрядного канала АЭ (4), кпд (5) от мощности выпрямителя с традиционной схемой «Кристалл ЛТ-30 Си»

Результаты исследований АЭ «Кристалл ЛТ-30 Си»

Использование традиционной схемы исполнения источника питания

На рис. 2 представлены экспериментальные характеристики лазера в зависимости от мощности, отбираемой от выпрямителя, в установившихся тепловых режимах АЭ «Кристалл ЛТ-30 Си» при частоте следования импульсов $f = 10$ кГц, давлении буферного газа неона $p_{Ne} = 150$ мм рт. ст., емкости накопительного конденсатора $C_n = 2200$ пФ и обострительного $C_{об} = 470$ пФ. Из хода кривых видно, что генерация возникает при температуре разрядного канала около 1300°C ($P_{выпр} = 1,6$ кВт), т.е. при концентрации атомов меди $0,7 \cdot 10^{15} \text{ 1/см}^3$ ($p_{Cu} \approx 0,01$ мм рт. ст.) (рис. 3) [15]. Максимальное значение мощности излучения 20 Вт (кривая 1) достигается при температуре канала 1550°C ($P_{выпр} = 2,7$ кВт), которой соответствует концентрация атомов меди $2 \cdot 10^{15} \text{ 1/см}^3$ ($p_{Cu} \approx 0,35$ мм рт. ст.). В данной точке мощность излучения на отдельных длинах волн также принимает максимальные значения – 11 Вт (55%) на $\lambda = 0,51$ мкм и 9 Вт (45%) на $\lambda = 0,58$ мкм. При температуре выше 1550°C спад мощности на зеленой линии (0,51 мкм, кривая 2) происходит значительно круче, чем на желтой (кривая 3). Последнее связано с тем, что нижний (метастабильный) уровень атомов на желтой линии расположен выше и, соответственно, менее подвержен тепловому заселению [4]. Полный срыв генерации на зеленой линии при этих условиях происходит при температуре канала около 1650°C ($P_{выпр} = 3,2$ кВт), на желтой – 1700°C ($P_{выпр} = 3,4$ кВт).

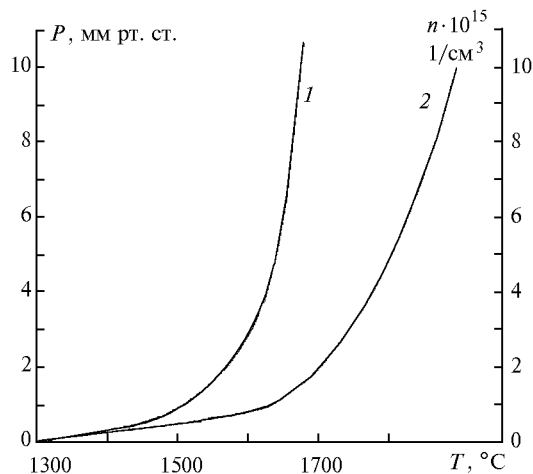


Рис. 3. Зависимости давления (1) и концентрации атомов меди (2) от температуры

На осциллограммах 6, 7 и 8 представлены импульсы напряжения, тока и излучения в оптимальном тепловом режиме АЭ – режиме максимальной мощности излучения. Длительность импульсов тока составила по основанию ≈ 300 нс (осц. 8), что примерно в 7 раз длиннее импульса излучения, т.е. времени существования инверсии. По этой причине нельзя было ожидать при традиционной схеме возбуждения высокоэффективной работы лазера, и максимальное значение кпд по мощности, отбираемой от выпрямителя, составило 0,75%.

Для расширения диапазона условий возбуждения были проведены исследования при емкостях накопительного конденсатора $C_n = 1650$ и 3300 пФ и давлениях буферного газа неона от 60 до 250 мм рт. ст. Результаты исследований сведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

P , мм рт. ст.	60	100	150	250
$C = 1650$ пФ, $P_{\text{выпр}} = 3$ кВт				
T_k , °C	1590	1585	1580	1560
$P_{\text{изл}}$, Вт	25,0	24,6	23,3	22,8
кпд, %	0,83	0,82	0,78	0,76
$C = 3300$ пФ, $P_{\text{выпр}} = 2,45$ кВт				
T_k , °C	1500	1555	1545	1520
$P_{\text{изл}}$, Вт	18,3	18,0	17,0	15,0
кпд, %	0,75	0,73	0,69	0,61

Из сравнительного анализа данных табл. 1 вытекают следующие выводы. С уменьшением емкости накопительного конденсатора рабочая температура разрядного канала, мощность излучения и кпд возрастают. При этом происходят уменьшение длительности и увеличение амплитуды импульсов возбуждения. Например, если при $C = 3300$ пФ и $P_{Nc} = 60$ мм рт. ст. длительность импульсов тока составляет около 350 нс, мощность излучения – 18,3 Вт и кпд – 0,75%, то при $C = 1650$ пФ соответственно 250 нс, 25 Вт и 0,83%.

С увеличением давления характеристики импульсов возбуждения ухудшаются и энергетические характеристики излучения падают. Причем мощность на зеленой линии падает сильнее, чем на желтой, что объясняется более высоким расположением ее верхнего (резонансного) уровня. Но чем лучше условия возбуждения, тем меньше спад мощности и кпд. Если при $C_n = 1650$ пФ и увеличении давления от 60 до 250 мм рт. ст. мощность и кпд снизились менее чем в 1,1 раза, то при $C_n = 3300$ пФ – более чем в 1,2 раза. Поэтому эффективная работа лазера при высоких давлениях возможна с короткими импульсами накачки, и это важно с точки зрения повышения долговечности АЭ. Чем выше давление буферного газа, тем меньше расход активного вещества в единицу времени и тем меньше скорость заплытия оптических окон.

Использование схемы емкостного удвоения напряжения и магнитного звена сжатия

При удвоении напряжения длительности импульсов возбуждения уменьшаются примерно в 2 раза. На рис. 4 представлены энергетические характеристики лазера в установившихся тепловых режимах 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 при заряде $C_n = 1000 + 1000 = 2000$ (пФ), обострительного $C_{об} = 235$ пФ и давления неона $P_{Nc} = 150$ мм рт. ст. Длительность импульса напряжения (осц. б) составила около 100 нс, а величина амплитуды – 21 кВ, импульса тока (осц. 7) – 160 нс и 380 А соответственно. Как и при традиционной схеме, генерация (кривая 1) возникает при температуре разрядного канала около 1300 °C (кривая 4) ($P_{\text{выпр}} = 2,2$ кВт). Максимальное значение мощности излучения (≈ 37 Вт) и кпд ($\approx 1\%$) (кривая 5) достигается при температуре на 80 °C выше, т.е. при

$T_k = 1630$ °C ($P_{\text{выпр}} = 3,6$ кВт). При данной температуре давление и концентрация атомов меди составляют 0,85 мм рт. ст. и $5 \cdot 10^{15}$ 1/см³ соответственно [14]. Таким образом, двукратное сжатие импульсов возбуждения привело в режиме генератора к увеличению мощности излучения в 1,8 раза (при $P_{Nc} = 150$ мм рт. ст. и $C_n = 2200$ пФ), кпд от выпрямителя – в 1,4 раза. В данной точке мощности излучения на отдельных длинах волн (кривые 2 и 3) принимают не только максимальные, но и примерно равные значения. Срыву генерации на зеленой линии (кривая 2) соответствует температура $T_k = 1750$ °C, на желтой – $T_k = 1800$ °C.

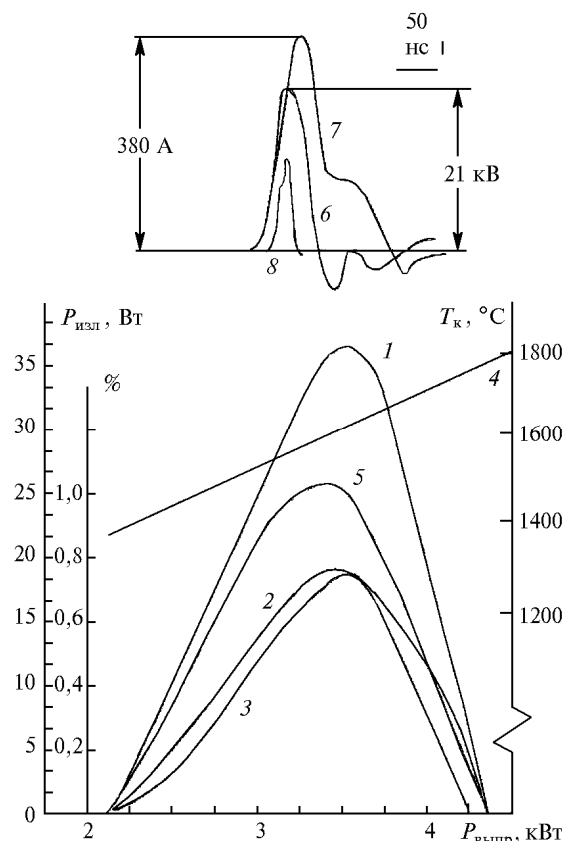


Рис. 4. Зависимости суммарной средней мощности излучения (1), мощности на отдельных длинах волн (2 – 0,51 мкм; 3 – 0,58 мкм), температуры разрядного канала (4), кпд (5) от мощности выпрямителя со схемой удвоения напряжения «Кристалл ЛТ-30 Су». Осциллограммы импульсов напряжения (6), тока разряда (7) и излучения (8) АЭ

Для оценки возможности дальнейшего повышения кпд снималась зависимость «мгновенных» значений средней мощности излучения от потребляемой мощности при постоянной температуре разрядного канала (рис. 5, кривая 1). Сущность эксперимента заключалась в резком изменении мощности выпрямителя от оптимальной рабочей точки ($P_{\text{выпр}} = 3,6$ кВт; $T_k = 1630$ °C; $P_{\text{изл}} = 37$ Вт; см. рис. 3) за счет регулировки напряжения и фиксации мощности излучения. Мощность фиксировалась с помощью преобразователя мощности ТИ-5 с инерционностью не более 6 с. Процесс перехода на новый режим составлял лишь несколько секунд, что не приводило к резкому изменению температурного режима АЭ, обладающего большой теплоемкостью. И, более того, после перехода изменившееся значение мощности излучения долгое время удерживалось на

одном и том же уровне. Последнее, в свою очередь, свидетельствовало о сохранении за это время начальной температуры разрядного канала и, соответственно, концентрации активного вещества. Например, при $P_{\text{выпр}} = 2,8$ и $4,4$ кВт указанное время составляло около 3 мин, при $P_{\text{выпр}} = 1$ кВт примерно 0,5 мин. Этого было достаточно, чтобы зарегистрировать основные параметры возбуждения и генерации.

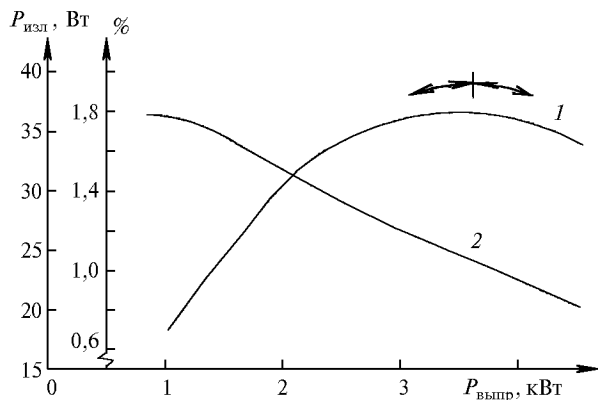


Рис. 5. Зависимости мгновенных значений мощности излучения (1) и кпд (2) от мощности выпрямителя со схемой удвоения напряжения при $T_k = 1630$ °С «Кристалл LT-30 Cu»

Из рис. 5 видно, что при изменении мощности выпрямителя от оптимального значения ($P_{\text{выпр}} = 3,6$ Вт) в сторону уменьшения мощность излучения (кривая 1) падает, в то время как кпд возрастает, достигая максимального значения 1,8% при $P_{\text{выпр}} = 1$ кВт. При мощностях выпрямителя выше оптимальных кпд снижается. Последнее связано, во-первых, с уменьшением мощности излучения из-за «перегрева» активной среды и, во-вторых, с нелинейным ростом потерь мощности в тиратроне.

Таким образом, из результатов данного эксперимента следует, что увеличение кпд возможно при мощности меньше оптимальной, но 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» подогрева. Эти выводы были подтверждены на АЭ с усиленной теплоизоляцией, кпд которого в оптимальном тепловом режиме ($P_{\text{выпр}} = 2$ кВт) составил 1,2–1,3%.

Для более полной оценки эффективности лазера проводилась оценка кпд по мощности, вводимой в АЭ. Для этого были проведены калориметрические измерения потерь мощности в тиратроне с тирактором (рис. 6, кривые 1 и 2) и магнитном звене сжатия (кривая 3) со схемой емкостного удвоения напряжения. Тирактор, представляющий собой нелинейный дроссель, предназначен для уменьшения стартовых потерь в тиратроне [12]. Он подключен непосредственно к аноду тиратрона. По измерениям Т.Б. Фогельсон [13] в остальных элементах зарядноразрядной цепи потери мощности составляют около 10%. Вводимая в АЭ мощность (кривые 4 и 5) рассчитывалась как разность между мощностью, отбираемой от выпрямителя, и суммарной мощностью потерь. То обстоятельство, что кривая 4 проходит выше кривой 5 (на 0,15 – 0,2 кВт), связано с более высокими общими потерями при схеме удвоения напряжения. Важно отметить, что при $P_{\text{выпр}} > 2,2$ кВт

потери мощности в тиратроне со схемой удвоения напряжения меньше (кривая 2) и поэтому, в данном случае, при высоких коммутируемых мощностях тиратрон работает в более облегченном режиме, т.е. повышается его надежность.

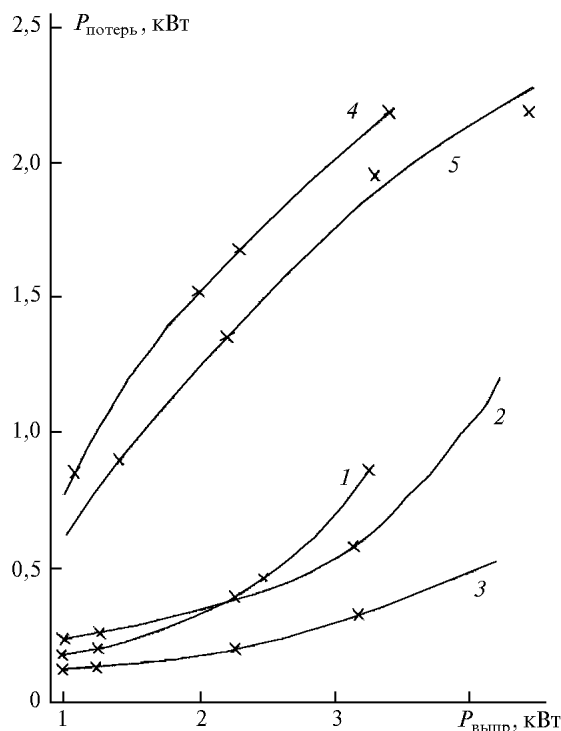


Рис. 6. Зависимости потерь мощности в тиратроне с тирактором (1, 2), звене магнитного сжатия (3) и АЭ (4, 5), от мощности выпрямителя с традиционной схемой возбуждения (1, 4) и со схемой удвоения напряжения (2, 3, 5) «Кристалл LT-30 Cu»

Кривые, выражающие зависимость кпд АЭ, представлены на рис. 7. Как видно, с традиционной схемой возбуждения максимальное значение кпд в оптимальном стационарном тепловом режиме ($T_k = 1550$ °С) составило $\approx 1,1\%$ (кривая 1) ($P_{\text{выпр}} = 1,84$ кВт), переходном режимах $\approx 1,2\%$ (кривая 3) ($P_{\text{выпр}} = 1,4$ кВт), со схемой удвоения напряжения $\approx 1,84\%$ (кривая 2) ($P_{\text{выпр}} = 2,0$ кВт) и $2,9\%$ (кривая 4) ($P_{\text{выпр}} = 0,7$ кВт) соответственно.

При использовании исследуемого АЭ в качестве усилителя мощности излучения в системе «задающий генератор – пространственный фильтр – усилитель мощности» [10] сьем мощности по сравнению с режимом генератора с традиционной схемой возбуждения увеличился с 20 до 23 Вт, кпд – с 1,08 до 1,24% (точка 5, рис. 7), со схемой емкостного удвоения напряжения – с 37 до 46,5 Вт и с 1,84 до 2,31% (точка 6, рис. 7) 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 ($46,5 / 23 = 2$) и кпд АЭ ($2,33 / 1,22 = 2$).

С целью дальнейшего повышения мощности излучения лазера были проведены исследования активных элементов с большим объемом активной (рабочей) среды – с $V_{\text{ак}} = 350$ и 900 м³. Элементной и технологической основой для создания этих приборов является АЭ «Кристалл LT-30 Cu».

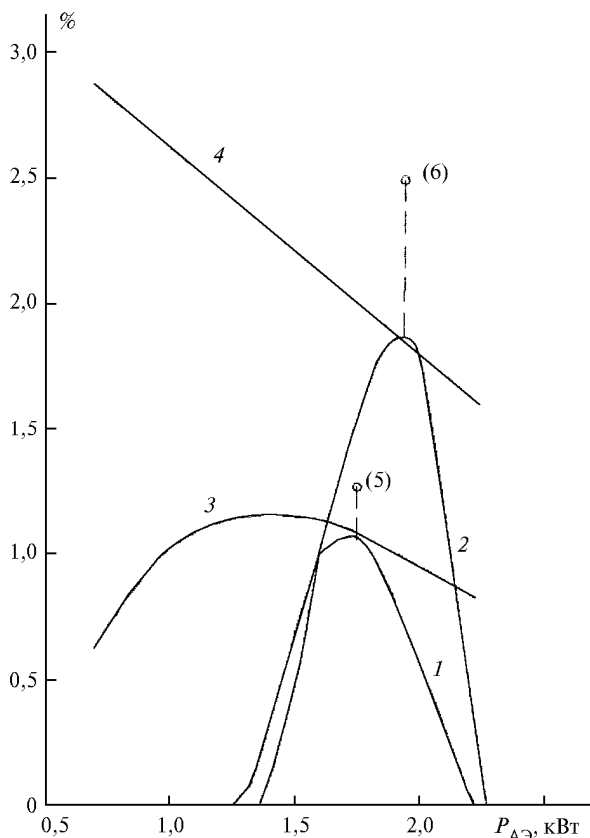


Рис. 7. Зависимости кпд в установившихся тепловых (1, 2) и переходных (мгновенных) (3, 4) режимах от мощности, вводимой в АЭ с традиционной схемой возбуждения (1, 3) и со схемой удвоения напряжения (2, 4) «Кристалл LT-30 Cu»

Результаты исследований АЭ «Кристалл LT-40 Cu» и «Кристалл LT-50 Cu»

АЭ «Кристалл LT-40 Cu» с $V_{ак} = 350 \text{ см}^3$ конструктивно отличается от АЭ «Кристалл LT-30 Cu» лишь удлиненным на 30 см разрядным каналом (диаметр канала 2 см), что соответствует межэлектродному расстоянию 123 см. АЭ «Кристалл LT-50 Cu» с $V_{ак} = 900 \text{ см}^3$ имеет такие же габаритные размеры, как и «Кристалл LT-40 Cu», а диаметр разрядного канала в 1,6 раза больше – 32 мм. Возбуждение АЭ осуществлялось от источника питания, модулятор которого выполнен по схеме емкостного удвоения напряжения (см. рис. 1,б). Оптический резонатор –

плоскосферический с радиусом «глухого» зеркала 3,5 м. Достигнутые значения средней мощности излучения с резонатором (режим генератора) для АЭ «Кристалл LT-40 Cu» составили 40–44 Вт, «Кристалл LT-50 Cu» – 50–55 Вт при кпд от мощности выпрямителя около 1%, а для съема мощности в режиме усилителя – 55–60 и 65–70 Вт соответственно. Для сравнительного анализа основные параметры исследуемых приборов сведены в табл. 2.

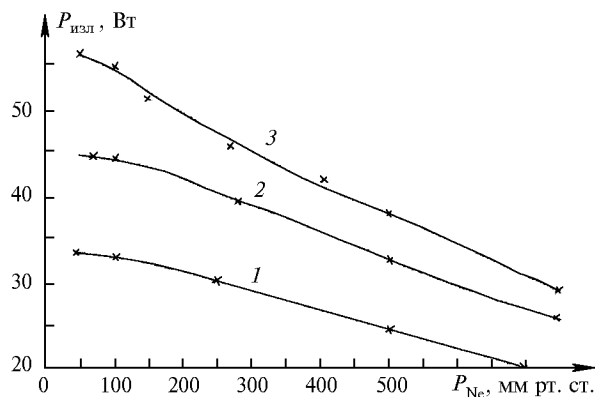


Рис. 8. Зависимости суммарной средней мощности излучения АЭ «Кристалл LT-30 Cu» (1), «LT-40 Cu» (2) и «LT-50 Cu» (3) от давления неона при потребляемых мощностях от выпрямителя 3,2; 4,0 и 5,5 кВт и $f = 10 \text{ кГц}$

На рис. 8 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-30 Cu» (кривая 1) уменьшилась с 33 до 21,5 Вт (\approx на 38%), «Кристалл LT-40 Cu» (кривая 2) – с 44 до 25 Вт (\approx на 43%), «Кристалл LT-50 Cu» (кривая 3) – с 56 до 29 Вт (\approx на 48%). Снижение суммарной мощности излучения связано, в первую очередь, со снижением мощности на зеленой длине волны. 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. Поэтому АЭ с большими объемами, как правило, имеют меньшие рабочие давления. Если в АЭ «Кристалл LT-30 Cu» выбранное значение рабочего давления составляет 250 мм рт. ст., то для «Кристалл LT-50 Cu» – 100–150 мм рт. ст. Но, с другой стороны, полученные результаты свидетельствуют о возможности работы лазера на парах меди при давлениях, близких к атмосферному, с уровнями мощности в десятки ватт. А высокое давление буферного газа – одно из основных путей повышения срока службы АЭ в отпаянном исполнении.

Таблица 2

Параметры АЭ	d , см	l , см	$V_{ак}$, см^3	$P_{Не}$, мм рт. ст.	f , кГц	$P_{выпр}$, кВт	$P_{изл}$		$P_{max}/V_{ак}$ усилителя, $\text{Вт}/\text{см}^3$
							Генератор	Усилитель	
ГЛ-201	2	93	250	250	10	3,2–3	23–25	25–28	0,11
«Кристалл LT-30 Cu»	2	93	250	150–250	10	3,2–3,6	32–37	40–44	0,18
«Кристалл LT-40 Cu»	2	123	350	180	10	4,0–4,4	40–44	55–60	0,18
«Кристалл LT-50 Cu»	3,2	123	900	100–150	10	5,0–5,5	50–55	65–70	0,08

Частотные характеристики АЭ (рис. 9) снимались с параметрами схемы, указанными на рис. 2,б. При изменении частоты следования импульсов в сторону увеличения от 10,5 до 20,5 кГц мощность излучения АЭ «Кристалл LT-

40 Cu» (кривая 1) снизилась незначительно \approx на 14% (с 44 до 38 Вт) при сохранении кпд на уровне 1%, «Кристалл LT-50 Cu» – на 13% (с 55 до 48 Вт) также при сохранении кпд 1%. При уменьшении частоты наблюдалось резкое

снижение мощности излучения, что объясняется увеличением ее потерь в тиратроне (из-за возрастания анодного напряжения) и соответственно снижением температуры разрядного канала. При уменьшении частоты с 10,5 до 6 кГц мощность АЭ «Кристалл LT-40 Cu» упала на 24% (до 33,5 Вт), «Кристалл LT-50 Cu» – также на 24% (до 42 Вт), а кпд с 1 до 0,75%. При замене емкости накопительного конденсатора $C_n = 1000 + 1000 = 2000$ (пФ) и обострительной емкости $C_{об} = 235$ пФ на $C_n = 1500 + 1500 = 3000$ (пФ) и $C_{об} = 300$ пФ при частоте 8 кГц были получены практически та же мощность излучения и кпд (точки 4 и 5), что и при 10,5 кГц. Для получения максимальной мощности каждая частотная точка, как показывает опыт исследований, должна быть оптимизирована не только по электрическим параметрам элементов схемы (емкости и индуктивности), но и по давлению неона.

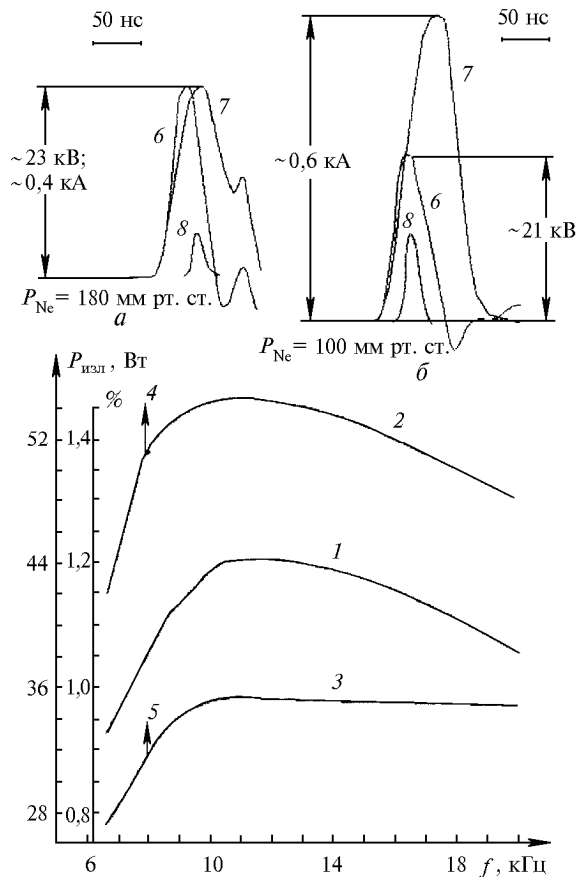


Рис. 9. Зависимости суммарной средней мощности излучения АЭ «Кристалл LT-40» (1), «LT-50 Cu» (2) и кпд (3) от частоты следования импульсов. Осциллограммы импульсов напряжения (6), тока разряда (7) и излучения (8) АЭ «LT-40 Cu» (а) и «LT-50 Cu» (б) при частоте $f = 10,5$ кГц

На базе АЭ «Кристалл LT-50 Cu» был изготовлен и частично исследован макет с большей на 30 см длиной

N.A. Lyabin. Commercial sealed-off Cu-vapor lasers of «Crystal» type with enhanced efficiency and radiation power.

Experimental results on enhancement of efficiency and radiation power of commercial pulse-periodic Cu-vapor lasers are presented. Due to designing, technological, and circuit innovations, the laser efficiency at generator operation was increased to 1–1.2% by the consuming power from rectifier and to 1.4–1.6% by power input into active element. A possibility is shown to increase the efficiency to 1.8 and 2.9%, respectively. At amplifier operation, the efficiency and power are 1.2–1.3 times higher (comparatively to generator operation). At the generator operation, the achieved value of the output power from the active element «Crystal LT-30 Cu» (active (working) medium volume of 250 cm³) was 37 W, at the amplifier operation – 44 W; «Crystal LT-40 Cu» (volume 350 cm³) – 44 and 60 W, «Crystal LT-50 Cu» (volume 900 cm³) – 55 and 70 W, respectively.

разрядного канала (межэлектродное расстояние – 150 см, $V_{ак} = 1200$ см³). Мощность излучения в режиме генератора составила около 57 Вт, в режиме усилителя – 80 Вт.

На базе АЭ «Кристалл LT-30 Cu» разработан отпаянный промышленный АЭ на парах золота «Кристалл LT-4 Au» ($\lambda = 0,628$ мкм) с мощностью излучения до 6 Вт при давлении неона 200–250 мм рт. ст. и частоте следования импульсов 10–20 кГц. Максимальная мощность 8,5 Вт была получена при оптимизации условий возбуждения АЭ с давлением неона 50 мм рт. ст.

Гарантированная минимальная наработка для АЭ «Кристалл LT-50 Cu» и «Кристалл LT-4 Au» составляет не менее 500 ч, «Кристалл LT-30 Cu» и «Кристалл LT-40 Cu» – не менее 1000 ч. В настоящее время в основном определены пути дальнейшего повышения срока службы АЭ и проводятся экспериментальные испытания.

1. Исаев А.А., Казарян М.А. Исследование импульсного лазера на парах меди // Квантовая электроника. 1977. № 4. С. 451.
2. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Эффективный импульсный лазер на парах меди с большой средней мощностью генерации // Письма в ЖЭТФ. 1972. № 16. С. 40.
3. Исаев А.А., Лемерман Г.Ю. Исследование импульсного лазера на парах меди при повышенных мощностях // Квантовая электроника. 1977. № 4. С. 1413.
4. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. К вопросу о предельных средних мощностях генерации лазеров на парах меди // Теплофизика высоких температур. 1980. № 18. С. 707.
5. Вохмин П.А., Климовский И.И. Предельные характеристики лазеров на самоограниченных переходах // Теплофизика высоких температур. 1980. № 16. С. 1080.
6. Kusher M.I. and Warner B.E. Large-bore copper-vapor lasers: Kinetic and scaling issues // J. Appl. Phys. 54 (6), June 1983.
7. Webb C.E. Copper and Gold vapor lasers: Recent advances and applications // Proc. of the International Conference on Lasers 87.
8. Zubov B.V., Лябин Н.А., Мишин В.И., Мучник М.Л., Паришин Г.Д., Черняк Е.Я., Чурсин А.Д. Исследование лазера на парах меди с большим резервом и улучшенными параметрами импульса возбуждения // Квантовая электроника. 1983. № 10. С. 1908.
9. Беляев В.П., Zubov B.V., Исаев А.А., Лябин Н.А., Соболев Ю.Ф., Чурсин А.Д. Пространственные, временные и энергетические характеристики излучения лазера на парах меди // Квантовая электроника. 1985. № 12. С. 74.
10. Zubov B.V., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. Эффективная система «генератор-усилитель» на основе лазерных активных элементов на парах меди // Квантовая электроника. 1986. № 13. С. 2431.
11. Zubov B.V., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. Активный элемент на парах меди для мощных лазерных систем типа «генератор-усилитель» // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 1. С. 28–31.
12. Zubov V.V., Chursin A.D., Lesnoy M.A., Ugolnicov S.A. Copper Vapor Lasers with sealed-off active elements // Proc. SPIE. 1993. V. 2110. P. 78–89.
13. Фогельсон Т.Б., Бреусова Л.Н., Вагин Л.Н. Импульсные водородные тиратроны. М.: Советское радио, 1971.
14. Агеев В.П., Атежжев В.В., Букреев В.С. и др. Импульсно-периодический эксимерный лазер с магнитным звеном сжатия // Журнал технической физики. 1986. № 56. С. 1387.
15. Коваленко В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. М.: Советское радио, 1975.