

УДК 621.373.826.038.823.4

# Лазер на парах цезия с диодной накачкой в импульсно-периодическом и непрерывном режимах\*

В. О. Паутов, С. М. Куликов,  
А. В. Рус

*Создан экспериментальный стенд для отработки лазера на парах цезия с диодной накачкой. Описана лазерная кювета, обеспечивающая прокачку лазерной среды через область генерации лазерного излучения.*

*На основе теоретической модели лазера написана расчетная программа.*

*Исследованы и определены: оптимальный режим работы источников диодной накачки; время выхода спектра источника накачки на заданную длину волны; давления буферных газов метана и гелия; температура рабочей среды. Получена непрерывная генерация мощностью ~220 Вт при эффективности лазера «свет в свет» ~32 %.*

*Исследована работа лазера в импульсно-периодическом режиме с частотой 100 Гц, получена генерация с пиковой мощностью ~700 Вт с кпд «свет в свет» 47 % и дифференциальным кпд 56 %.*

## Введение

В настоящее время в мире активно исследуются газовые лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой (ЛПЩМ) [1–12]. Времена жизни возбужденных состояний атомов всех щелочных металлов очень малы (~20–30 нс), поэтому возможно создание только непрерывных или квазинепрерывных лазеров с таким типом активной среды.

Такие лазеры обладают рядом полезных свойств. Во-первых, это эффективная диодная накачка и высокая квантовая эффективность (95,3 % для цезия, 98,1 % для рубидия и 99,6 % для калия по сравнению, например, с 76 % для неодима); во-вторых – газовая активная среда, дающая возможность минимизировать оптические неоднородности в лазерной среде.

Использование диодной накачки позволяет с высокой эффективностью  $\eta_{\text{лд}} \sim 40\text{--}70\%$  преобразовать низковольтную электрическую энергию в энергию узкополосного излучения накачки. Высокая квантовая эффективность в сочетании с возможностью управления шириной линии и коэффициентом поглощения паров металла путем изменения давления и температуры среды позволяют, согласно расчетам, достигать кпд преобразования излучения накачки в лазерное  $\eta_{\text{лаз}} \sim 50\text{--}60\%$ . Таким образом, кпд лазера может достигать ~20–40 %. С учетом необходимых затрат энергии на поддержание температурного режима лазерных диодов и собственно лазера ожидаемый кпд лазера «от розетки» составит  $\eta \sim 15\text{--}30\%$ .

Изначально концепция создания лазеров мощностью от 40 кВт до 2 МВт предусматривала использование в качестве источников накачки относительно дешевых широкополосных лазерных диодов  $\Delta\lambda \sim 2$  нм ( $\lambda = 852,3$  нм) при уширении до этого значения атомарной линии поглощения

\* Доклад на XI научно-техн. конф. «Молодежь в науке». Саров, 7–9 ноября 2012 г.

путем добавки буферного газа (гелия) вплоть до давления  $\sim 25$  атм. Другой подход – сузить линию излучения диодов до атомарной линии поглощения, но это сложная и дорогостоящая техническая задача. В настоящее время рассматривают синтез этих методов, когда линия излучения лазерного диода сужается до  $\sim 0,2\text{--}0,3$  нм при помощи объемных решеток Брэгга, а линия поглощения атомов щелочным металлом уширяется до этих же значений добавкой буферного газа (давления при этом составляют несколько атмосфер).

Проведено достаточно большое количество работ по созданию ЛПЩМ. Основные результаты следующие.

- При накачке титан-сапфировым лазером ( $\Delta\lambda = 0,01$  нм) получена генерация на атомах Cs и Rb. Экспериментально продемонстрирована эффективность преобразования излучения накачки в лазерное излучение: кпд «свет в свет» достигал 63 % [4–6].

- При накачке узкополосными лазерными диодами  $\Delta\lambda \sim 0,03$  нм на цезии получена мощность  $\sim 10$  Вт при эффективности передачи энергии «свет в свет»  $\sim 62$  % [7].

- Максимальная мощность излучения лазера на парах цезия 49 Вт была получена при поперечной накачке узкополосными лазерными диодами  $\Delta\lambda \sim 0,03$  нм при эффективности передачи энергии «свет в свет»  $\sim 31$  % [8, 9].

- При накачке лазерными диодами с шириной полосы  $\Delta\lambda \sim 0,3$  нм на цезии была получена мощность  $\sim 1,4$  Вт при эффективности передачи энергии «свет в свет»  $\sim 2$  % [10].

- Максимальная мощность излучения лазера на парах щелочного металла была получена на рубидии и составила 207 Вт при кпд «свет в свет»  $\sim 9$  % [11].

Все эксперименты были выполнены в условиях, когда лазерная среда заключалась в замкнутом объеме размером в несколько кубических сантиметров и охлаждение среды осуществлялось за счет теплообмена между средой и стенками кюветы.

В экспериментах, проведенных авторами данной работы, впервые для лазеров на парах щелочных металлов применялась прокачка лазерной среды через область генерации лазерного излучения. Цель работы – экспериментальная отработка лазера на парах цезия и исследование физических процессов, протекающих в активной среде. В дальнейшем полученные результаты могут быть использованы для создания более мощных лазерных систем.

## Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

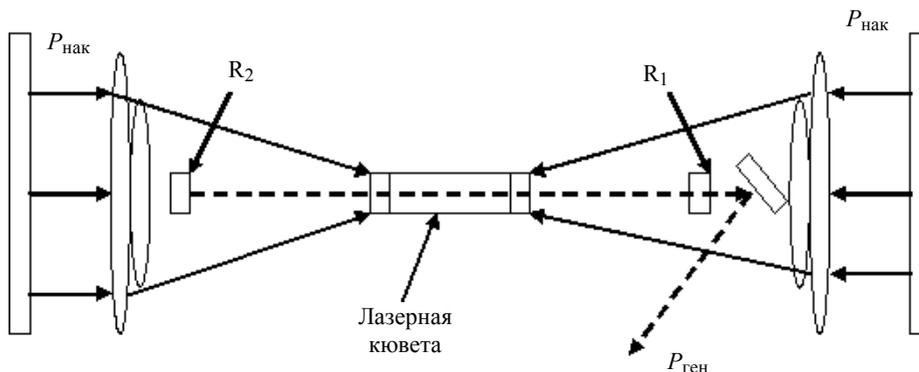


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для накачки цезиевого лазера авторы использовали узкополосные линейки диодных лазеров (ЛДЛ) с коррекцией расходимости излучения по двум взаимно перпендикулярным направлениям с помощью асферических микролинз и с внешними селективными отражателями. Линейки диодных лазеров оптически объединены в едином корпусе (модуле) по 15 линеек в каждом. Излучающая поверхность модуля (зона свечения) представляла собой прямоугольник размером  $5 \times 30$  мм. Четыре модуля лазерных линеек, расположенных в горизонтальной плоскости, представляли собой один элемент накачки – матрицу. Оптическая система сложения излучения в горизонтальной плоскости позволяла получить суммарную зону свечения от 4 модулей размером  $5 \times 120$  мм. Расходимость излучения в горизонтальной плоскости составляла  $\theta_x \sim 3$  мрад, в вертикальной плоскости  $\theta_y \sim 0,1$  рад. Система ввода излучения в лазерную кювету позволяла сформировать в лазерной кювете пучок излучения накачки длиной  $\sim 40$  мм с поперечным размером  $5 \times 4$  мм при мощности излучения на окне лазерной кюветы  $\sim 350$  Вт с одной стороны.

Второй такой же источник накачки располагался по другую сторону лазерной кюветы (см. рис. 1), что позволяло проводить эксперименты как при односторонней, так и при встречной накачке. В экспериментах использовался плоскопараллельный резонатор, зеркала которого  $R_1$  (коэффициент отражения 0,35),  $R_2$  (коэффициент отражения 0,95) и  $R_3$ , выводящее лазерное излучение, имели размер  $5 \times 15$  мм и располагались в пучке излучения накачки, что приводило к частичному виньетированию излучения накачки.

Ширина спектра излучения отдельных линеек лазерных диодов по полувысоте составляла  $\sim 0,3$  нм, однако в экспериментах наблюдалось смещение максимума линии излучения отдельных линеек относительно линии поглощения цезия и ширина спектра суммарного излучения всех линеек составляла  $\sim 0,7$  нм, причем  $\sim 90$  % всей мощности накачки содержалось в области шириной 1 нм.

Лазерная кювета объемом  $12 \text{ см}^3$  была включена в замкнутую двухконтурную систему прокачки лазерной среды через пучок накачки (суммарный объем системы  $\sim 3000 \text{ см}^3$ ). Основной контур обеспечивал непрерывный проток лазерной среды через зону генерации со скоростью до 20 м/с, второй – обдув окон кюветы с той же скоростью. Окна кюветы выполнены из сапфира и просветлены. Пропускание окна кюветы на длине волны накачки и на длине волны генерации было примерно одинаковым и составляло  $\tau \sim 0,92$ . Вся конструкция выполнена из нержавеющей стали и снабжена нагревательными элементами и датчиками температуры. Температурный режим поддерживался системой автоматической термостабилизации, причем температура окон всегда поддерживалась на  $\sim 10$  °С выше температуры металлоконструкций. Длина лазерной кюветы составляет 40 мм.

Для «перемешивания» верхних уровней цезия мы использовали метан. Давление лазерной среды (гелий +  $\text{CH}_4$  + Cs) в экспериментах варьировалось в пределах от 1 до 5 атм (при комнатной температуре), парциальное давление метана – в пределах от 0,1 до 1 атм (при комнатной температуре).

### *Теоретическая модель лазера*

Для анализа результатов и оптимизации условий генерации лазера разработана квазидвумерная программа [12], которая позволяет рассчитывать характеристики генерации лазерного излучения в следующих предположениях.

Пучки накачки  $P_{\text{нак1}}$ ,  $P_{\text{нак2}}$  и лазерные пучки  $P_{\text{лаз1}}$ ,  $P_{\text{лаз2}}$ , распространяющиеся внутри резонатора, соответственно, вправо и влево, имеют переменное поперечное сечение, которое изменяется подобно сечению гауссова пучка:

$$S = S_w + \pi \left( \frac{\alpha}{2} (z - z_w) \right)^2, \quad (1)$$

где  $S_w$  – сечение пучка в перетяжке,  $z_w$  – положение перетяжки,  $\alpha$  – угол полного раскрыва пучка накачки на бесконечности.

Таким образом, учитывается возможное изменение интенсивности излучения при сужении или расширении пучка. Каустики пучков накачки и лазерного считаются совпадающими. Квазидвумерность заключается в том, что распространение накачки и лазерного излучения по продольной координате рассчитывается путем прямого интегрирования уравнений переноса, тогда как изменение интенсивности вследствие изменения сечения пучка учитывается в предположении, что поперечное распределение интенсивности остается однородным. На границах счетной области по продольной координате могут быть заданы входные пучки накачки и лазерного излучения. Кроме того, на этих же границах задаются отражающие зеркала как для лазерного излучения, так и для излучения накачки. Входные пучки и зеркала учитываются через граничные условия. Таким образом, может моделироваться как режим генерации, так и режим усиления с инжекцией внешнего сигнала. Активная среда ограничена окнами, для которых вводится заданный коэффициент пропускания.

Кинетические процессы в активной среде, поглощение излучения накачки и усиление лазерного излучения описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c} \frac{\partial P_{\text{лаз1}}}{\partial t} + \frac{\partial P_{\text{лаз1}}}{\partial z} &= \sigma_{21} (n_2 - n_1) P_{\text{лаз1}} - \gamma P_{\text{лаз1}} + k_{\text{ш}} S n_2, \\ \frac{1}{c} \frac{\partial P_{\text{лаз2}}}{\partial t} - \frac{\partial P_{\text{лаз2}}}{\partial z} &= \sigma_{21} (n_2 - n_1) P_{\text{лаз2}} - \gamma P_{\text{лаз2}} + k_{\text{ш}} S n_2, \\ \frac{1}{c} \frac{\partial P_{\text{нак1}}(v)}{\partial t} + \frac{\partial P_{\text{нак1}}(v)}{\partial z} &= \sigma_{13}(v) \left( n_1 - \frac{1}{2} n_3 \right) P_{\text{нак1}}(v), \\ \frac{1}{c} \frac{\partial P_{\text{нак2}}(v)}{\partial t} - \frac{\partial P_{\text{нак2}}(v)}{\partial z} &= \sigma_{13}(v) \left( n_1 - \frac{1}{2} n_3 \right) P_{\text{нак2}}(v), \\ \frac{\partial n_1}{\partial t} &= \sigma_{21} (n_2 - n_1) \frac{P_{\text{лаз1}} + P_{\text{лаз2}}}{S} - \int \sigma_{13}(v) \left( n_1 - \frac{1}{2} n_3 \right) \frac{P_{\text{нак1}}(v) + P_{\text{нак2}}(v)}{S} dv, \\ \frac{\partial n_2}{\partial t} &= -\sigma_{21} (n_2 - n_1) \frac{P_{\text{лаз1}} + P_{\text{лаз2}}}{S} - \frac{n_2}{\tau_2} + \gamma_{32} n_3 - \gamma_{23} n_2, \\ \frac{\partial n_3}{\partial t} &= \int \sigma_{13}(v) \left( n_1 - \frac{1}{2} n_3 \right) \frac{P_{\text{нак1}}(v) + P_{\text{нак2}}(v)}{S} dv - \frac{n_3}{\tau_3} - \gamma_{32} n_3 + \gamma_{23} n_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $P_{\text{лаз1}}$ ,  $P_{\text{лаз2}}$ ,  $P_{\text{нак1}}$ ,  $P_{\text{нак2}}$  – мощности волн, распространяющихся вправо (индекс 1) и влево (индекс 2) для лазерного излучения и излучения накачки;  $c$  – скорость света;  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  – населенности, соответственно, уровней  $^2S_{1/2}$ ,  $^2P_{1/2}$ ,  $^2P_{3/2}$  атома щелочного металла;  $\sigma_{21}$  и  $\sigma_{13}$  – сечения соответствующих переходов;  $S(z)$  – поперечное сечение пучка в данной точке внутри резонатора;  $\gamma$  – коэффициент поглощения активной среды;  $\gamma_{32}$  и  $\gamma_{23} = \gamma_{32} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$  – константы скорости

перемешивания по верхним подуровням,  $\Delta E$  – разность энергий между верхними уровнями;  $\tau_3$  и  $\tau_2$  – времена жизни относительно спонтанного распада уровней 3 и 2;  $k_{ш}$  – константа, определяющая амплитуду источника шумового излучения, зависит от геометрии каустики и ожидаемой ширины линии генерации.

Интегрирование системы (2) производится в спектрально-групповом приближении методом конечных разностей на равномерной сетке по  $z$ . Шаг интегрирования по времени связан с шагом пространственной сетки соотношением  $\Delta t = \frac{\Delta z}{c}$ .

Задавались следующие параметры расчета, соответствующие условиям эксперимента:

- мощность накачки – 350 Вт с каждой стороны;
- ширина спектра накачки – 0,7 нм;
- угол полного раскрыва пучка накачки  $\alpha = 0$ ;
- сечение пучка в перетяжке  $S_w = 0,2 \text{ см}^2$ ;
- положение перетяжки  $z_w = 18 \text{ мм}$ , что соответствует середине кюветы;
- длина активной среды – 36 мм;
- резонатор плоскопараллельный с коэффициентами отражения зеркал  $R_1 = 0,35$ ;  $R_2 = 0,99$ .

Такие параметры, как давления метана и гелия, температура активной среды, пропускание окон лазерной кюветы на длинах волн накачки и генерации, в расчетах варьировались.

## Экспериментальные результаты

В процессе работы источников диодной накачки необходимо поддерживать температуру лазерных диодов в заданном температурном диапазоне, чтобы спектр источников накачки имел определенную длину волны. На практике это реализуется прокачкой воды заданной температуры через медное основание, на котором расположены лазерные диоды.

Для прихода всей системы в термодинамическое равновесие требуется время, поэтому был исследован режим работы источников накачки на основе лазерных диодов и определено время выхода спектра источников накачки на заданную длину волны. На рис. 2 показано изменение спектра одного модуля во времени (спектры сняты в моменты времени 0, 30, 60 и 90 секунд после включения накачки). Из рисунка видно, что вначале центральная линия спектра находится в районе 851,5 нм (что далеко от оптимальной 852,15 нм); по мере прогрева диода спектр начинает смещаться в длинноволновую область и к 60-й секунде становится максимально близок к оптимальному.

Для определения оптимального времени выхода спектра на режим были получены зависимости мощности генерации от времени при варьировании температуры активной среды и давления буферных газов. На рис. 3, 4 приведены графики зависимости мощности генерации от времени при разных температурах для различных вариаций давлений буферных газов. Из рисунков видно, что практически во всех экспериментах спектр лазерных диодов выходит на режим за время  $\geq 75 \text{ с}$ , поэтому в дальнейшем накачка лазерной среды осуществлялась после выхода лазерных диодов на режим – через 90 с.

Эти эксперименты также имели своей целью определить оптимальные параметры работы лазера – давление буферных газов и температуру среды. На рис. 5 показаны экспериментальные и расчетные зависимости мощности лазерной генерации от давления гелия. Получено хорошее согласие между экспериментом и расчетом, т. е. представленная выше теоретическая модель вполне адекватно описывает созданный лазер на парах цезия. Из рис. 5 видно, что при увеличении давления гелия мощность генерации продолжает расти. Однако конструкция лазерной кюве-

ты рассчитана на максимальное давление  $\sim 7$  атм, поэтому при напуске смеси  $\sim 5$  атм при комнатной температуре получаем, что при рабочих температурах  $120\text{--}130$  °С давление в кювете будет  $\sim 7$  атм.

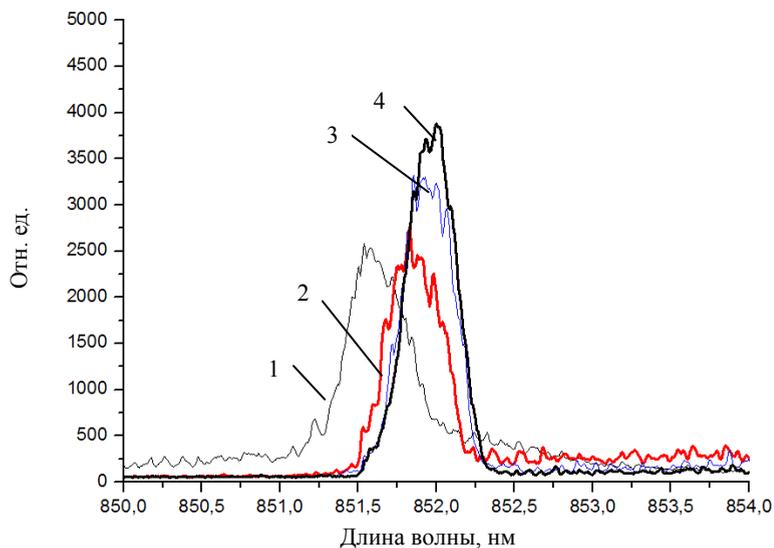


Рис. 2. Спектр модуля диодной накачки в моменты времени 0 (1), 30 (2), 60 (3) и 90 с (4) после включения накачки

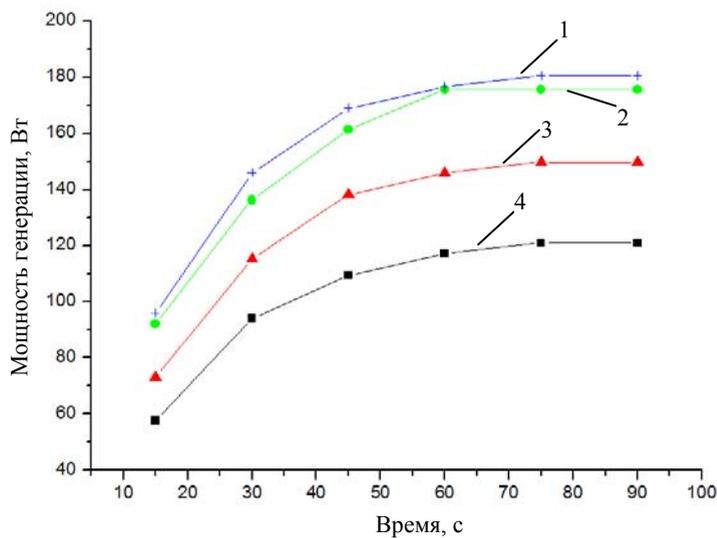


Рис. 3. Зависимость мощности генерации лазера от времени при давлении буферных газов метана 0,15 атм и гелия 2,3 атм при температуре 130 °С (1), 120 °С (2), 110 °С (3) и 100 °С (4)

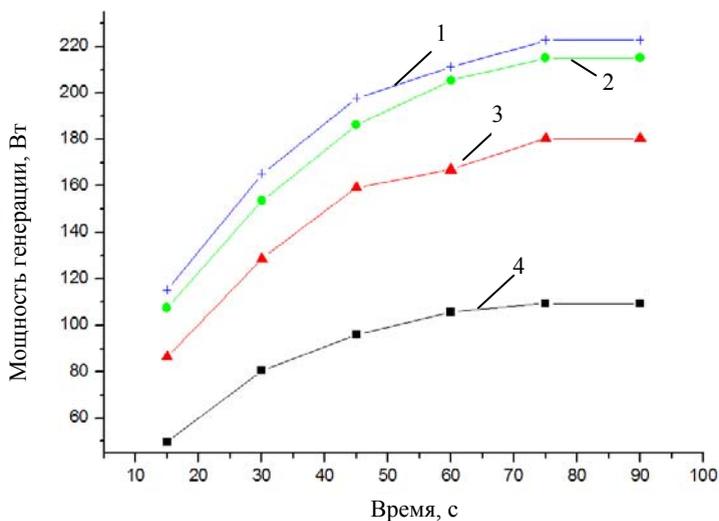


Рис. 4. Зависимость мощности генерации лазера от времени при давлении буферных газов метана 0,3 атм и гелия 4 атм при температуре 130 °С (1), 120 °С (2), 110 °С (3) и 100 °С (4)

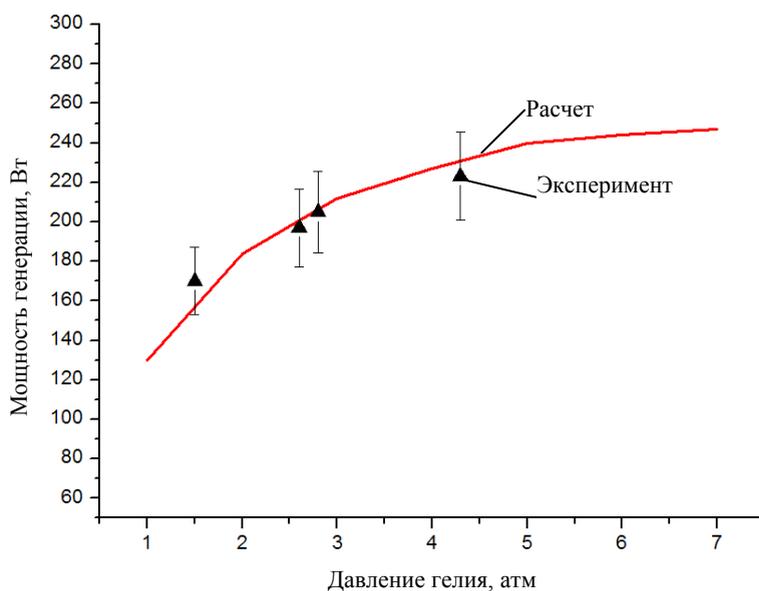


Рис. 5. Зависимость мощности генерации от давления гелия

Итак, максимальная мощность была получена при давлении буферных газов метана 0,3 атм и гелия 4 атм (при комнатной температуре). Экспериментальная и расчетная зависимости мощности генерации от температуры среды при оптимальных давлениях буферных газов показана на рис. 6. Из рисунка видно, что существует оптимальная температура, при которой мощность генерации максимальна, при дальнейшем повышении температуры мощность (а вместе с ней и КПД лазера) падает. В нашем случае (для данной длины кюветы, каустики накачки и найденных оптимальных давлений буферных газов) оптимальная температура составляет 130 °С. Максимальная мощность составила 223 Вт при эффективности преобразования «свет в свет» 32 %.

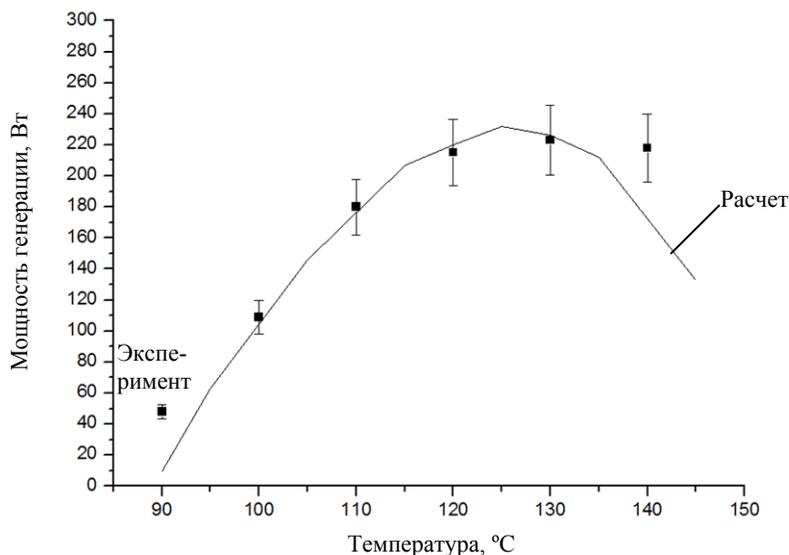


Рис. 6. Зависимость мощности генерации от температуры при оптимальных давлениях буферных газов (выдержка накачки ~90 с)

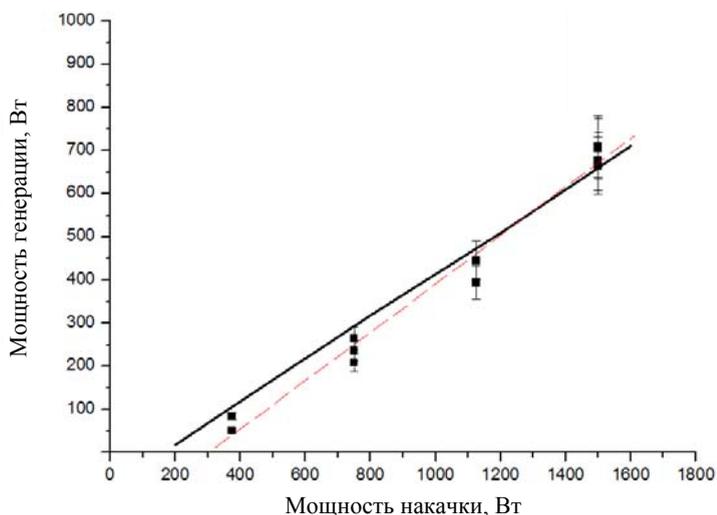


Рис. 7. Зависимость мощности генерации от мощности накачки: ■ – эксперимент; — – расчет (дифференциальный КПД 49 %); - - - – линейная интерполяция экспериментальных точек (дифференциальный КПД 56 %)

Для определения максимально достижимого КПД были проведены эксперименты в импульсно-периодическом режиме. Источники накачки были переведены в импульсно-периодический режим работы со следующими параметрами: частота повторения импульсов 100 Гц, длительность импульса 260 мкс (скважность в этом случае равняется ~40, т. е. тепловыделение в среде уменьшается в 40 раз). В таком режиме удалось повысить пиковую мощность излучения накачки на окне кюветы с одной стороны до 750 Вт (в непрерывном режиме было 350 Вт), поэтому тепловыделение в среде уменьшилось не в 40, а в ~20 раз по сравнению с непрерывным режимом. Были проведены опыты по получению генерации при варьировании мощности накачки. На рис. 7 приведены экспериментальная и расчетная зависимости мощности генерации лазера от мощности накачки.

Максимальная мощность генерации достигала 709 Вт при эффективности преобразования «свет в свет» 47 %. По этому графику можно определить дифференциальный КПД лазера – 56 %. Это означает, что в непрерывном режиме генерации можно получить выходную мощность практически киловаттного уровня с КПД ~50 % при условии уменьшения тепловыделения в активной среде.

## **Выводы**

Разработана теоретическая модель лазера на парах цезия, на ее основе создана расчетная программа, которая достаточно хорошо описывает экспериментальные результаты.

Создан экспериментальный стенд для отработки лазера на парах щелочного металла цезия с диодной накачкой; разработана лазерная кювета для лазера на парах цезия, которая обеспечивает прокачку лазерной среды через область генерации лазерного излучения.

Исследован режим работы источников диодной накачки, определено время выхода спектра источника накачки на заданную длину волны.

Определены оптимальные параметры работы лазера: давления буферных газов метана и гелия, и температура рабочей среды. Получена непрерывная генерация мощностью 223 Вт при КПД лазера «свет в свет» 32 %. Исследована работа лазера в импульсно-периодическом режиме, получена генерация с пиковой мощностью 709 Вт при КПД «свет в свет» 47 %.

## **Список литературы**

1. Beach R. J., Krupke W. F., Kanz V. K. et al. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model and power scaling // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2004. Vol. 21. P. 2151.
2. Page R. H., Beach R. J., Kanz V. K. Multimode-diode-pumped gas (alkali – vapor) laser // *Opt. Lett.* 2006. Vol. 31. P. 353.
3. Krupke W. F., Beach R. J., Kanz V. K. et al. New class of cw high-power diode-pumped alkali lasers (DPALs) // *Proc. of SPIE*. 2004. Vol. 5448. P. 7–17.
4. Zhdanov B. V., Ehrenreich T., Knize R. J. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser // *Opt. Commun.* 2006. Vol. 260. P. 696–698.
5. Zhdanov B. V., Maes C., Ehrenreich T. et al. Optically pumped potassium laser // *Opt. Commun.* 2007. Vol. 270. P. 353–355.
6. Krupke W. F., Beach R. J., Kanz V. K., Payne S. A. 795 nm resonance transition rubidium laser // *Opt. Lett.* 2003. Vol. 28. P. 2336.
7. Zhdanov B. V., Knize R. J. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser // *Opt. Lett.* 2007. Vol. 32. P. 2167.
8. Wang You et al. Approaches of output improvement for a cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled laser-diode-array // *Phys. Lett. A*. 2007. Vol. 360. P. 659–663.
9. Zhdanov B. V., Shaffer M. K., Sell J., Knize R. J. Transverse-pumped Cs vapor laser // *Proc. of SPIE*. 2009. Vol. 7196. P. 71960F.

10. Wang Y., Kasamatsu T., Zheng Y. et al. Cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled quasi-continuous-wave laser-diode array // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 141112.
11. Zweiback J., Komashko A., Krupke W. F. Alkali vapor lasers // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7581. P. 7581G.
12. Богачев А. В., Гаранин С. Г., Дудов А. М. и др. Лазер на парах цезия с диодной накачкой и прокачкой лазерной среды по замкнутому циклу // Квантовая электроника. 2012. Т. 42(2). С. 95–98.

## Diode Pumped Caesium Vapour Laser in Pulse and CW Mode

V. O. Pautov, S. M. Kulikov, A. V. Rus

*Experimental stand for adjustment DPAL is created. Developed laser cuvette DPAL with circulation laser active medium across the laser camera is described. Math model on basis of created DPAL theoretical model has a good comparison with experimental results.*

*Investigated and defined follow: optimal operation mode of diode pumping source; stabilization time of diode pumping source spectral line; optimal buffer gas pressure (methane and helium); optimal active medium temperature.*

*Power generation 220 W in CW mode with «optical-to-optical» efficiency 32 % is achieved.*

*Pulse operation mode with frequency 100 Hz is researched. Peak power generation 700 W with «optical-to-optical» efficiency 47 % and slope efficiency 56 % is achieved.*