

**В.И. Воронов, Г.С. Евтушенко, А.Л. Егоров, В.Ф. Елаев,  
Г.А. Карманов, А.Н. Мальцев, С.Ю. Мирза, А.Н. Солдатов,  
В.Б. Суханов, В.Ф. Федоров, А.Г. Филонов, Н.А. Юдин**

### **ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И НАКАЧКОЙ ЛАЗЕРОМ НА ПАРАХ МЕДИ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Описан лазер на парах меди со стабилизированными выходными характеристиками «Милан–5», а также лазерная приставка на красителе с распределенной обратной связью «ЛЖК–12», предназначенные для применения в области лазерной спектроскопии, лазерного зондирования параметров аэрозолей атмосферы и т.д.

В лазере «Милан–5» получена стабильность средней мощности излучения на фиксированной частоте  $\pm 2\%$  и стабильность энергии генерации в импульсе при изменении частоты следования импульсов генерации  $\pm 5\%$  в диапазоне 5–15 кГц. Максимальная выходная мощность лазера на парах меди достигнута для случая плоскопараллельного резонатора – 5 Вт, неустойчивого – 3 Вт.

Приведены оценки спектральных характеристик «ЛЖК–12» в зависимости от ширины спектра и расходимости пучка лазера накачки. Описаны конструктивные особенности и генерационные параметры лазерной приставки. При ширине спектра  $\sim 0,02$  нм, средняя мощность генерации «ЛЖК–12» составляла  $\sim 0,2$  Вт.

Для лазерного зондирования параметров аэрозоля, влажности, температуры необходимы эффективные источники лазерного излучения видимого и ближнего ИК диапазонов спектра, имеющие длительности импульсов излучения единицы и десятки наносекунд и частоты следования этих импульсов до 10 ... 15 кГц [1]. При этом для научных исследований важным параметром является стабильность энергии в импульсе лазерной генерации как на фиксированной частоте следования, так и в широком диапазоне изменения последней.

Такие же источники лазерного излучения, но с плавной перестройкой в видимой и ближней ИК областях спектра при ширине линии 0,01 ... 0,02 нм представляют интерес для лазерной спектроскопии атмосферных газов.

Высокоэффективные импульсно-периодические лазеры видимого диапазона со стабилизированной средней мощностью 1 ... 5 Вт могут быть использованы в лазерных навигационных устройствах, работающих через атмосферу в условиях ограниченной видимости [2].

Наиболее эффективными источниками когерентного излучения в видимом диапазоне длин волн являются импульсные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Они сочетают в одном устройстве такие достоинства, как высокую импульсную и среднюю мощность генерации, малую длительность импульса излучения, высокий к. п. д., высокую частоту следования импульсов, малую расходимость и т.д. [3, 4]. Поскольку лазер на парах металлов с неустойчивым резонатором имеет высокие когерентные свойства [5], а спектр его излучения представляет собой атомные спектральные линии, комплекс, состоящий из лазера на парах металлов и лазера на красителях с распределенной обратной связью (ЛКРОС), позволяет в принципе создать узкополосный перестраиваемый по длинам волн источник когерентного излучения с высокой средней мощностью и нано– и даже пикосекундной длительностью импульса генерации. Такой лазерный комплекс и описан в настоящей работе.

С целью активного воздействия на параметры генерации было предложено реализовать в газоразрядной трубке лазера на парах меди два импульсно-периодических разряда, задача одного из которых заключается в создании инверсной населенности, а второго – в направленном изменении параметров газоразрядной плазмы [6]. В этом случае параметры первого разряда могут быть оптимизированы по максимальной мощности генерации или максимальному к.п.д. Кроме того, оперативное управление параметрами возбуждения позволит регулировать параметры генерации в широких пределах. Регулируя энергию импульсов второго разряда, можно поддерживать оптимальную температуру активного объема ГРТ.

Для практической реализации был использован способ возбуждения, когда одновременно формировалось два импульса: импульс возбуждения и импульс подогрева. В этом случае, при изменении частоты следования импульсов, импульс возбуждения оставался постоянным, а импульс подогрева изменялся по амплитуде и длительности так, что суммарная средняя мощность, подводимая к газоразрядной трубке лазера (ГРТ), оставалась неизменной. Стабилизация средней мощности генерации осуществляется за счет обратной связи и регулирования амплитуды импульса возбуждения.

Блок–схема стабилизированного лазера приведена на рис. 1. Задающий генератор 1 вырабатывает импульсы рабочей частоты следования (5 ... 15 кГц), которые поступают на блоки запуска 2 и 3, формирующие импульсы запуска для коммутаторов К1 и К2. При работе лазера с максимальной частотой сле-

дования импульсов, лазер работает в режиме саморазогрева от одного источника возбуждения. В этом режиме лазер работает следующим образом. При подаче импульса запуска на коммутатор К1 рабочая емкость  $C_p$  (2 ... 3 пФ) разряжается через газоразрядную трубку 4, что приводит к формированию импульсов, обеспечивающих разогрев рабочего объема до рабочей температуры, и возбуждению атомов. Генерация формируется в резонаторе, образованном зеркалами 5 и 6. Рабочая емкость резонансно заряжается от высоковольтного выпрямителя 7 через зарядную индуктивность  $L_3$ , диод VD и индуктивность  $L_m$ . После разогрева активного объема ГРТ появляется генерация и часть излучения (~5%) проходит через диэлектрическое зеркало 5, ослабляется нейтральным фильтром 8 и попадает на фотоприемник 9. Электрический сигнал, пропорциональный мощности генерации, поступает на измеритель мощности 10. С помощью стабилизатора мощности 11 осуществляется сравнение напряжения на выходе измерителя и напряжения на датчике мощности 12, а сигнал рассогласования поступает на вход электронного регулятора 13, с помощью которого уменьшается напряжение высоковольтного выпрямителя при превышении установленной мощности генерации. Таким образом, устанавливая с помощью датчика 12 уровень мощности можно плавно регулировать мощность генерации лазера. Для получения одинаковой энергии импульсов генерации при изменении частоты следования импульсов используется пропорциональная связь между частотой задающего генератора и датчиком мощности. Так, например, если датчик мощности установлен на «три ватта», то на частоте 15 кГц средняя мощность лазерного излучения будет составлять 3 Вт, а при снижении частоты до 5 кГц пропорционально уменьшается напряжение датчика, а мощность генерации в этом случае будет равна 1 Вт. Так как со снижением частоты следования импульсов уменьшается мощность, вводимая в разряд от источника возбуждения, то для компенсации мощности, необходимой для разогрева ГРТ, в работу вступает источник подогрева. Источник подогрева работает так же, как и источник возбуждения, и управляется от задающего генератора 12 через схему управления подогревом 16, с помощью которой задается уровень подогрева ГРТ на минимальной частоте следования импульсов (5 кГц). С повышением частоты следования импульсов пропорционально уменьшается напряжение источника подогрева и при частоте ~ 12 кГц сводится до минимума. Для уменьшения влияния импульсов подогрева на генерационные характеристики лазера напряжение с высоковольтного выпрямителя 14 приблизительно в 2 раза меньше, чем с выпрямителя 5. Величина емкости источника подогрева  $C_n$  в несколько раз больше емкости  $C_p$  и подбирается при настройке лазера.

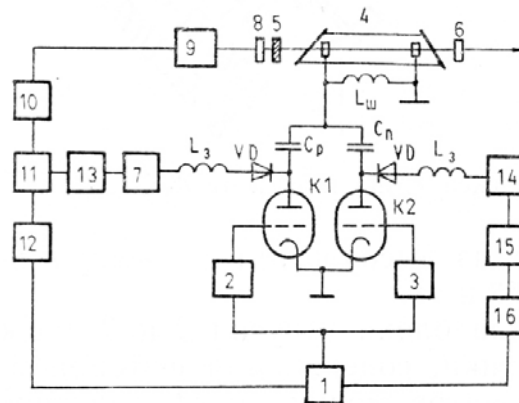


Рис. 1. Блок-схема лазера «Милан-5»

Конструктивно лазер на парах металлов состоит из 4-х блоков: лазерной головки, 2-х блоков высокого напряжения и блока управления.

Для повышения эффективности возбуждения в лазерной головке в непосредственной близости от ГРТ установлены тиратроны К1 К2 (см. рис. 1), конденсаторы  $C_p$  и  $C_n$ , зарядные индуктивности  $L_3$ , диоды VD и шунтирующая индуктивность  $L_m$ . Тиратроны, а также кожух газоразрядной трубки имеют жидкостное охлаждение.

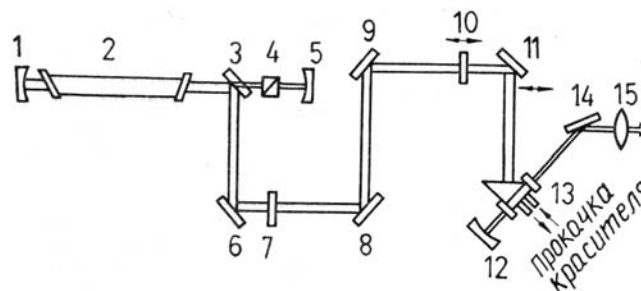


Рис. 2. Оптическая схема лазерного комплекса «Милан-5» и «ЛЖК-12»

Блоки высокого напряжения состоят из высоковольтных выпрямителей 7 и 14 и электронных регуляторов 13 и 15.

Блок управления включает в себя два блока запуска 2 и 3, блок задающего генератора 1 и блок автоматики, содержащий фотоприемник 9, измеритель мощности 10, стабилизатор мощности 11, датчик мощности 12 и схему управления подогревом 16.

Оптическое излучение из лазерной головки к фотоприемнику передается с помощью световода.

Зависимость средней мощности генерации лазера с плоскопараллельным резонатором при изменении частоты следования импульсов в диапазоне 5–15 кГц — практически линейная. Изменение по частоте производилось со скоростью 0,5 кГц/мин. Стабильность энергии генерации в импульсе при изменении частоты следования импульсов от 0 до 15 кГц составляла около  $\pm 5\%$ . Стабильность средней мощности генерации на фиксированной частоте 7 кГц составляла  $\pm 2\%$ . Лазер устойчиво работает со средней мощностью 5 Вт с плоскопараллельным резонатором.

Для эффективного преобразования излучения ЛПМ в перестраиваемую генерацию ЛКРОС большое значение имеют пространственные и спектральные характеристики пучка накачки. Для оптимизации генерационных параметров ЛКРОС мы исследовали расходимость пучка ЛПМ с двухзеркальным [7] и трехзеркальным [8] неустойчивыми резонаторами (НР) при различных коэффициентах увеличения  $M$ . Лучшие результаты были получены с трехзеркальным НР, имеющим коэффициент увеличения  $M = 30$  (рис. 2), состоящим из сферических зеркал 1, 5 с фокусными расстояниями 1200 и 40 мм соответственно, плоского отражающего зеркала 3 с отверстием связи и поляризационной призмы Глана 4. Измерение доли излучения ЛПМ в телесный угол, близкий к дифракционному, проводилось по методике, описанной в работе [9]. В этой же работе отмечалось наличие частотной зависимости коэффициента выхода излучения в дифракционный пучок, что в нашем случае качественно иллюстрируется осциллограммами, приведенными на рис. 3, показывающими связь формы и длительности импульса излучения с этим коэффициентом. На том же рисунке показана зависимость отношения средней мощности излучения в дифракционном пучке  $P_{\text{я}}$  к общей мощности излучения ЛПМ  $P_{\text{я+ф}}$  в процентах при изменении частоты следования импульсов возбуждения в пределах 5–16 кГц. Поскольку ЛКРОС эффективно возбуждается лишь излучением  $P_{\text{я}}$ , то, как видно из рис. 3, КПД преобразования системы ЛПМ — ЛКРОС будет возрастать с уменьшением частоты повторения импульсов накачки.

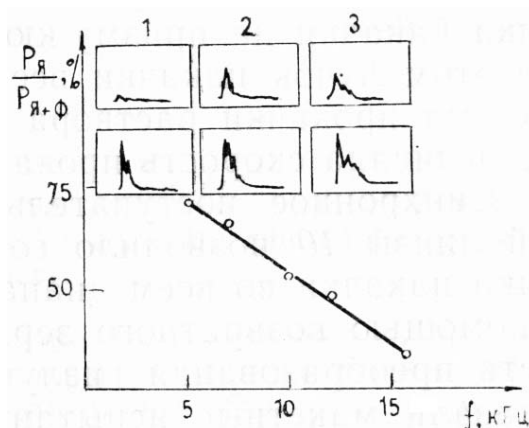


Рис. 3. Зависимость процентного вклада дифракционного пучка в излучение ЛПМ на длине волны 510,6 нм от частоты следования импульсов генерации. Вверху — осциллограммы импульсов генерации  $P_{\text{я}}$  (сверху) и  $P_{\text{я+ф}}$  (снизу) на частотах следования 15,6; 10; 5 кГц (слева — направо)

При разработке ЛКРОС «ЛЖК–12» была использована призмная схема формирования интерферирующих пучков накачки [10]. Приведем оценочный расчет спектральных параметров системы ЛПМ — ЛКРОС в зависимости от ширины спектра и расходимости пучка лазера накачки. Связь длины волны генерации  $\lambda_{\text{ген}}$  и накачки  $\lambda_{\text{н}}$  определяется выражением [11]:

$$\lambda_{\text{ген}} = \frac{\lambda_{\text{н}}}{n_{\text{пр}} \cdot \sin \varphi / n_{\text{кр}}}, \quad (1)$$

где  $n_{\text{пр}}$ ,  $n_{\text{кр}}$  — показатели преломлений материала призмы—кюветы и раствора красителя;  $2\varphi$  — угол между интерферирующими пучками.

Дифференцируя выражение (1) по  $\lambda_{\text{н}}$  и  $\varphi$ , получим выражение для ширины спектра ЛКРОС в зависимости от спектральной ширины  $\Delta\lambda_{\text{н}}$  и расходимости  $\Delta\varphi$  излучения накачки:

$$\Delta\lambda_{\text{ген}}^{\lambda_{\text{н}}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{н}}}{n_{\text{пр}} \cdot \sin \varphi / n_{\text{кр}}}, \quad (2)$$

$$\Delta\lambda_{\text{ген}}^{\varphi} = \frac{\lambda_n \cdot \Delta\varphi}{\frac{n_{\text{пр}}}{n_{\text{кр}}} \cdot \left( \frac{1}{\cos \varphi} - \cos \varphi \right)}. \quad (3)$$

Оценим ширину спектра генерации для конкретного случая: ЛКРОС на красителе оксазин–17,  $\lambda_{\text{ген}} = 630$  нм;  $\lambda_n = 510,6$  нм;  $\Delta\lambda_n = 4 \cdot 10^{-3}$  нм;  $n_{\text{пр}} = n_{\text{кр}} = 1,5$ , расходимость пучка накачки меняется в течение импульса генерации от  $10^{-3}$  до  $3,2 \cdot 10^{-5}$  рад (дифракционный предел). Используя выражения (1)–(3), получим значения ширины спектра ЛКРОС —  $\Delta\lambda_{\text{ген}}^{\lambda_n} \sim 5 \cdot 10^{-3}$  нм,  $\Delta\lambda_{\text{ген}}^{\varphi} \sim 0,6–0,02$  нм. Итак, определяющую роль в формировании спектра генерации ЛКРОС играет расходимость излучения лазера накачки. Эффективную генерацию с минимальной шириной спектра  $\sim 2 \cdot 10^{-2}$  нм следует ожидать на заднем фронте импульса накачки, где расходимость излучения близка к дифракционной (при условии превышения накачки порогового значения). Отметим, что приведенный выше расчет носит оценочный характер, поскольку он не учитывает спектральный контур линии ЛПМ и динамику волнового фронта пучка накачки.

Оптическая схема «ЛЖК–12» приведена на рис. 2. Излучение ЛПМ с помощью отражающих зеркал 6, 8, 9, 11 направлялось в кювету-призму ЛКРОС. Для фокусировки пучка накачки использовалась цилиндрическая линза 10 с фокусным расстоянием 50 см. При необходимости длинноволновая компонента лазера на парах меди исключалась из пучка накачки с помощью интерференционного фильтра 7 с пропусканием 99% и 3% на длинах волн 510,6 и 578,2 нм. Перестройка длины волны генерации осуществлялась изменением угла падения пучка накачки на призму-кювету с помощью перемещения зеркала 11, при этом пучок накачки всегда был центрирован на ребро призмы. Система прокачки раствора красителя на основе лабиринтного насоса обеспечивала скорость прокачки до 3,5 л/мин.

Синхронное поступательное движение зеркала 11 и фокусирующей линзы 10 позволило сохранить постоянные условия фокусировки пучка накачки во всем диапазоне перестройки длины волны генерации. С помощью возвратного зеркала 12 удавалось увеличить эффективность преобразования излучения накачки в генерацию ЛКРОС. Как показали макетные испытания, мощность генерации ЛЖК-12 существенно зависела от параметров и точности юстировки зеркала 12.

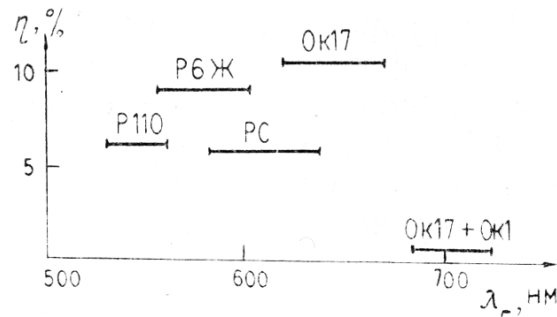


Рис. 4. Диапазон перестройки длины волны и максимальные КПД лазера на красителях «ЛЖК–12»

На рис. 4 показаны области перестройки длины волны генерации и соответствующие коэффициенты преобразования, полученные в максимуме перестроечной кривой. Ширина спектра генерации «ЛЖК–12» при мощности накачки, близкой к пороговой, составляет 0,01 нм. Средняя мощность генерации в максимуме перестроечной кривой родамина 6Ж достигает 0,2 Вт.

Лазерный комплекс, описанный в данной работе, или его составные части могут найти применение, кроме указанных выше задач атмосферной оптики, в лазерной технологии контроля или изготовления изделий микроэлектроники [12], в медицине [13], в диагностике плазмы методами поглощения [6] и рассеяния света [14], в дактилоскопии, скоростной записи голографической, фотографической информации и т. д. Поэтому в ближайшее время предполагается начать выпуск опытной партии лазеров типа «Милан–5» на одном из промышленных предприятий.

1. Arshinov Yu. F., Zuev V. E., Naats I. E. et al. — Proc. Intern. Conf. on Lasers'82, New-Orlean, USA, 1982.
2. Зуев В. Е., Пересыпкин В. П., Фадеев В. Я. и др. Лазерные устройства для судовождения. — Новосибирск: Наука, 1985.
3. Walter W. T., Solimene N., Piltch M. et al. — IEEE J. Quant. Electron., 1977, v. 3, p. 380.
4. Петраш Г. Г. Импульсные газоразрядные лазеры. — УФН, 1971, т. 105, вып. 4, с. 645.
5. Tenenbaum J., Smilanski J., Gabay S., Levin L. A., Erez G., Lavi S. — Optics Communs., 1980, v. 32, p. 473.
6. Солдатов А. Н., Федоров В. Ф. — Квантовая электроника, 1933, т. 10, с. 974.

7. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Раутиан С.Г. — Квантовая электроника, 1974, т. 1, № 4, с. 863.
8. Hargrove R.S., Grove R., Kan T. — IEEE J. Quantum Electr., 1979, v. QE-15, № 11, p. 1228.
9. Елаев В.Ф., Мирза С.Ю., Суханов В.Б. и др. — Квантовая электроника, 1986, т. 13, с. 914.
10. Chandra S., Takeuchi N., Hartman S.R. — Appl. Phys. Lett., 1972, v. 21, № 4, p. 144.
11. Рубинов Л.Н., Эфендиев Т.Ш. — ЖПС, 1977, т. 27, вып. 4, с. 634.
12. Глинкин Л.С., Епихин В.Н. — Микроэлектроника, 1985, сер. 3, вып. 3(219), с. 35.
13. Панцыров Ю.М. — Хирургия, 1978, № 3, с. 123.
14. Пятницкий Л.Н., Вохмин П.А., Климовский И.И., Марголин Л.Я. — Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 10, с. 2282.

СКБ научного приборостроения  
«Оптика» СО АН СССР, Томск  
Институт оптики атмосферы  
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
16 ноября 1987 г.

V.I. Voronov, G.S. Evtushenko, A.L. Egorov, V.F. Elaev, G.A. Karmanov, A.N. Mal'tsev, S.Yu. Mirza, A.N. Soldatov, V.B. Sukhanov, V.F. Fedorov, A.G. Filonov, N.A. Yudin. **Distributed Feedback Dye Laser Pumped by Stabilized-Output Copper Vapor Laser.**

DFB dye laser pumped by a stabilized CVL designed for laser spectroscopy, laser sounding of atmospheric aerosol parameters, etc. is reported. The dye laser configuration is the oscillator–amplifier chain in a single optical cell. The laser spectral line width was measured to be 0.02 nm for an average power of 0.2 W. The CVL average output was stabilized within  $\pm 2\%$  at a fixed PRR and the pulse energy stability was found to be within  $\pm 5\%$  for PRR's of 5–15 kHz. CVL provided average powers of 5 and 3 W for a plane-parallel laser cavity and an unstable resonator geometry, respectively.