

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.373.826

**А.Л. Бутаков, В.И. Воронов, Г.С. Евтушенко, В.В. Зуев,
А.Е. Кирилов, А.Н. Мальцев, С.Ю. Мирза, Ю.П. Полунин,
В.Б. Суханов, В.О. Троицкий**

МНОГОЦВЕТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ЛИДАРА ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

В работе представлены результаты разработки и исследования многоцветного лазерного излучателя на основе лазеров на растворах красителей и нелинейном кристалле, накачиваемых лазерами на парах меди. Описываемый излучатель предназначен для лидара с приемным зеркалом диаметром 2 м, реализующего метод многочастотного зондирования микрофизических параметров атмосферного аэрозоля до высот не менее 15 км, а также, метод СКР-зондирования влажности и температуры атмосферы до высот 5 км. Рабочие длины волн лидарного передатчика 510,6, 578,2, 654,0, 271,2 нм. На первых трех линиях средняя мощность одновременной генерации составляет не менее 1 Вт. Максимальная суммарная средняя мощность на зеленой и желтой длинах волн превышает 30 Вт, на красной длине волны — до 9 Вт, для УФ-излучения — 0,9 Вт.

Для исследования процессов погодо- и климатообразования необходимо развивать комплексные методы и средства зондирования атмосферы. В НТК «Институт оптики атмосферы» СО АН СССР в настоящее время создается комплексная лидарная станция «КОЛИС» [1] на основе приемной системы с главным зеркалом диаметром 2,2 м и набора лазерных излучателей, которая предназначена для одновременного зондирования вертикальных профилей влажности, температуры, микрофизических параметров аэрозоля, включая высотные профили лидарного отношения.

В данной статье представлены результаты разработки и исследования одного из передатчиков станции «КОЛИС», а именно — многоцветного лазерного излучателя на основе лазеров на растворах красителей, накачиваемых лазерами на парах меди. Этот излучатель предназначен для реализации метода многочастотного зондирования микрофизических параметров атмосферного аэрозоля [2], а также метода СКР-зондирования влажности и температуры [3].

Метод многочастотного зондирования аэрозолей предполагает наличие 3–4 линий зондирующего излучения, расположенных примерно через 80–100 нм относительно друг друга в микроокнах прозрачности атмосферы [2]. Следовательно, ширина линий может быть $\sim (10\div 40)$ Å, а воспроизводимость длины волны ~ 1 Å.

Для определения по методу СКР тех же микрофизических параметров аэрозолей, а также влажности и температуры атмосферы может использоваться лазерное излучение, лежащее в видимой области спектра, но предпочтительнее использовать УФ-излучение [4].

Одним из самых эффективных лазеров видимого диапазона является лазер на парах меди [5], который и был выбран в качестве источника излучения в желто-зеленой области спектра для аэрозольного зондирования и зондирования методом СКР, а также в качестве источника накачки перестраиваемых лазеров видимого излучения на растворах красителей и нелинейных кристаллов, используемых для получения УФ-излучения.

Изложенные выше соображения и модельные расчеты, сделанные нами для оценки точности восстановления атмосферных параметров, привели к необходимости разработки технических требований, предъявляемых к основным параметрам лидарного передатчика, которые приведены в табл. 1.

Для реализации указанных в табл. 1 характеристик лидарного передатчика были проведены исследования системы «генератор—усилитель» на парах меди с целью получения высоких энергетических параметров излучения накачки. Имеется ряд работ [6–8], посвященных исследованию таких систем, в которых, в частности, показано, что использование усилительных каскадов совместно с пространственным селектором после генератора позволяет значительно увеличить мощность генерации в дифракционном пучке. Нами были исследованы отпаянные активные элементы различной геометрии и объема с разными типами резонаторов. Эксперименты проведены с газоразрядными трубками, имеющими диаметр разрядного канала от 10 до 35 мм и длину от 500 до 1000 мм. В качестве коммутаторов использовались тиратроны ТГИ1–1000/25, ТГИ1–2000/35 и ТГИ1–2500/50. Диапазон рабочих частот равнялся 4–10 кГц, временная задержка импульса излучения генератора относительно усилителя менялась от –30 до +80 нс, давление буферного газа — от 10 до 500 мм рт. ст.

Технические требования к лидарному передатчику

№ п/п	Параметры излучения лидарного передатчика	Задачи и методы зондирования	
		Многочастотное зондирование микрофизических параметров аэрозолей до высот 15 км	СКР-зондирование микрофизических параметров аэрозолей, влажности и температуры до высот 5 км
			10,0 ($\lambda_1 + \lambda_2$) 0,5 (λ^4)
1	Средняя мощность генерации в одной линии, Вт	1,0 ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) <10	<30
2	Частота повторения, кГц	10 ÷ 30	10 ÷ 30
3	Длительность импульса, нс	≤ 0,5	≤ 0,5
4	Расходимость пучка, мрад	$\lambda_1 = 510,6$	$\lambda_1 = 510,6$
5	Длина волны, нм	$\lambda_2 = 578,2$	$\lambda_2 = 578,2$
6	Ширина спектра, нм	$\lambda_3 = 654,0$	$\lambda_4 = 271,2$
7	Воспроизводимость длины волны, отн. ед.	≤ 1,0 $5 \cdot 10^{-4}$	— —

Некоторые результаты наших исследований приведены в табл. 2. Для получения результатов, приведенных в первой, пятой и шестой строках табл. 2, использовалась схема питания лазеров с импульсным трансформатором и магнитным сжатием импульса после коммутации двумя параллельно включенными тиратронами ТГИ1–1000/25, а во второй, третьей и четвертой строках — схема резонансной перезарядки накопительной емкости непосредственно на газоразрядный промежуток. Для лазеров с диаметром канала 15 и 27 мм проведены измерения мощности излучения с телескопическим резонатором ($M = 14$). Средняя мощность излучения с расходимостью 0,2 мрад составила 2,4 Вт при диаметре канала 15 мм и 8,8 Вт при диаметре 27 мм. В пятой и шестой строках табл. 2 приведены результаты испытаний двух- и трехкаскадных систем лазеров. В двухкаскадной системе между генератором и усилителем вводилась 6-метровая оптическая задержка. В трехкаскадной системе между генератором и первым усилителем ставился коллиматор для расширения пучка до 34 мм с пространственным селектором в виде диафрагм и оптической задержкой 5 м. Генератор в трехкаскадной системе работал с телескопическим резонатором, и суммарная средняя мощность генерации, приведенная в табл. 2, — это мощность в пучке с расходимостью, близкой к дифракционной.

Таблица 2

Характеристики некоторых лабораторных макетов лазеров на парах меди

№ п/п	Диаметр разрядного канала, мм	Длина разряда, мм	U_v , кВ	$J_{ср.}$, А	P_{Ne} , мм рт ст.	f_1 , кГц	$P_{ср.}$, Вт	$P_{\Sigma ср.}$, Вт	Примечание
1	15	560	5,5	0,34	400	5,80	3,8	—	Два
2	25	720	5,0	0,80	20	6,25	12,5	—	ТГИ1-1000/25
3	27	1000	5,5	0,63	37	7,70	15,5	—	с водяным охлаждением,
4	35	1000	5,5	0,77	70	6,67	17,0	—	резонатор плоскостепенный
5	35	1000	5,4	0,95	—	5,88	11,5	—	Генератор
6	35	1000	5,2	0,57	—	5,88	14,5	22,0	Усилитель
	15	560	4,0	0,35	300	6,25	1,5	—	Генератор
	35	1000	6,0	1,00	200	6,25	12,0	31,5	Усилитель
	35	1000	6,0	0,70	200	6,25	14,0	—	Усилитель

Форма импульса генерации системы «генератор—усилитель» повторяет, как правило, форму импульса, задающего генератор, и несколько превосходит его по длительности. Максимальная мощность системы реализуется при задержке импульса возбуждения генератора относительно импульса возбуждения усилителя на 20 нс. Расходимость излучения системы при использовании телескопического

резонатора с $M = 14$ составляет $0,1-0,3$ мрад. Длительность генерации по полувысоте находится в диапазоне от 20 до 50 нс.

Из приведенных в табл. 2 результатов следует, что параметры лидарного передатчика на длинах волн λ_1, λ_2 (табл. 1) обеспечиваются уже двухкаскадной системой «генератор–усилитель» с активными элементами, имеющими диаметр газоразрядного канала 27 мм и длину разряда 1000 мм.

Для разработки лазерного излучателя с длиной волны $\lambda_3 = 654,0$ нм, соответствующей одному из окон прозрачности атмосферы, были проведены исследования спектральных и энергетических характеристик лазеров на растворах органических красителей, накачиваемых излучением лазера на парах меди с целью получения максимального КПД преобразования излучения накачки в излучение с заданной длиной волны λ_3 . В желто-красной области нами исследованы соединения, синтезированные в НИИОПиК, а также родамин В фирмы *Lambda Physik* и родамин В производства ПНР.

Экспериментальная установка (рис. 1) включала в себя лазер накачки на парах меди, выполненный по следующей схеме: задающий генератор (ЗГ) с диаметром канала 15 мм – усилитель (УС) с диаметром канала 30 мм. В ЗГ использовался неустойчивый резонатор 1, 2, 3 с $M = 10$. Между каскадами ЗГ и УС устанавливался пространственный фильтр 4, 5, 6. Излучение накачки с помощью сферического зеркала 7 и цилиндрической линзы 8 направлялось в кювету 9 лазера на красителях. Резонатор последнего представлял собой плоское зеркало 10 с 99%-ным отражением в области генерации и плоскопараллельную пластину 11 в качестве выходного зеркала. Три пленочных интерферометра 12, 13, 14 внутри резонатора применялись для селекции спектра лазера на красителях. При исследовании активных сред применялась квазипродольная схема лазера на красителях, описанная в [9]. В этой схеме использовалась вращающаяся кювета объемом 5 мл, что позволяло исследовать малые навески красителей, а также оценивать фотостабильность активного раствора. Во всех случаях в качестве растворителя брали этиловый спирт, очищенный путем двойной перегонки. Средние мощности генерации и накачки измерялись с помощью ИМО-2, а регистрация спектральных характеристик осуществлялась системой МДР-23-ФЭУ-ФЭП2 с регистрацией на самописце. Более подробно методика эксперимента изложена в [10].

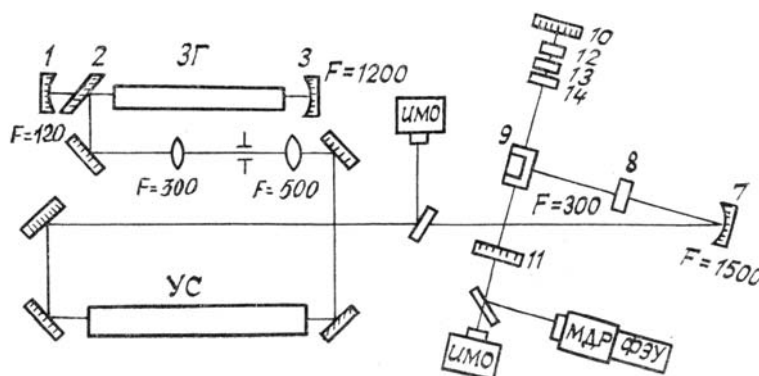


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования генерационных характеристик красителей

В табл. 3 приведены генерационные характеристики соединений, излучающих в области $\lambda_3 = 654$ нм. В правой колонке табл. 3 приведены КПД испытанных соединений в области 654 нм, нормированные на КПД ОК-17. Анализ показывает, что лучшим по энергетическим параметрам в этой области оказался ОК-17.

Таблица 3

Параметры генерации красителей в красной области спектра

Краситель	Люминесценция				Генерация в резонаторе					
	$\lambda_{\text{пик}}$, нм	λ_{max} , нм	$\Delta\lambda$ (0,5), нм	I , %	неселективном			селективном		
					λ_{max} , нм	$\Delta\lambda$ (0,5), нм	$\eta/\eta_{\text{ОК-17}}$	λ_{max} , нм	$\Delta\lambda$ (0,5), нм	η (654) $\eta_{\text{ОК-17}}$ (654)
ОК-17	510,6 578,2	636	613–664	15	638	635–643	1,0	639	615–683	1,0
Ф-430	та же	630	616–649	16	629	626–635	1,1	629	612–658	0,8
КВН-124	та же	627	616–646	16	628	625–637	1,3	634	616–655	0,9

Испытание этих же красителей в схеме квазипродольной накачки на фотоустойчивость дало следующий результат. ОК-17 оказался наиболее подвержен фотораспаду. Время снижения мощности генерации на 50% для него было бы на порядок меньше, чем для остальных красителей. По получен-

ным результатам время непрерывной работы раствора ОК-17 объемом 1,0 л оценено в 100 ч. На рис. 2 приведена зависимость мощности генерации ОК-17 от мощности накачки. Кривая имеет тенденцию к насыщению, и КПД преобразования излучения имеет значение, близкое к 15%. Спектрограмма излучения лазера на ОК-17 приведена на рис. 3, а. На шкале длин волн показано окно прозрачности атмосферы в этом спектральном диапазоне.

Нами также была исследована возможность получения лазерной генерации на полиметиновом красителе № 4501у в области окна прозрачности с центром на длине волны 789 нм. Наличие этой длины волны позволяет, при необходимости, расширить набор длин волн для измерения микрофизических параметров аэрозоля по методу многочастотного зондирования.

На рис. 2 приведена зависимость мощности генерации от мощности накачки для этого красителя. КПД преобразования излучения достигал 6%. Спектрограмма излучения красителя с селекцией двумя пленочными интерферометрами показана на рис. 3, б. Время жизни 1 л раствора составляло не менее 100 ч. В системе прокачки красителя используется специально разработанный для нее лабиринтный насос, который обеспечивал напор до 30 м водяного столба и расход 10 л/мин при прокачке через систему «фильтр — кювета». Конструкция насоса имеет измеритель уровня красителя в бачке и датчик контроля работы уплотнения.

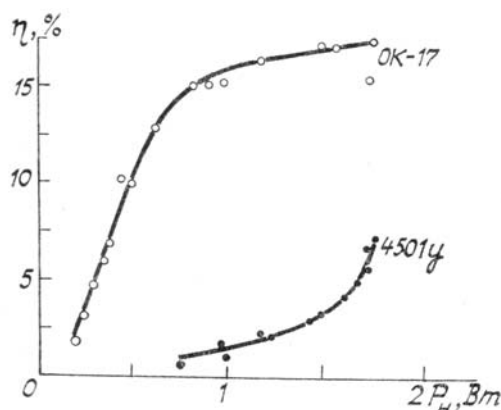


Рис. 2. Зависимость средней мощности генерации красителей ОК-17 № 4501у от мощности накачки

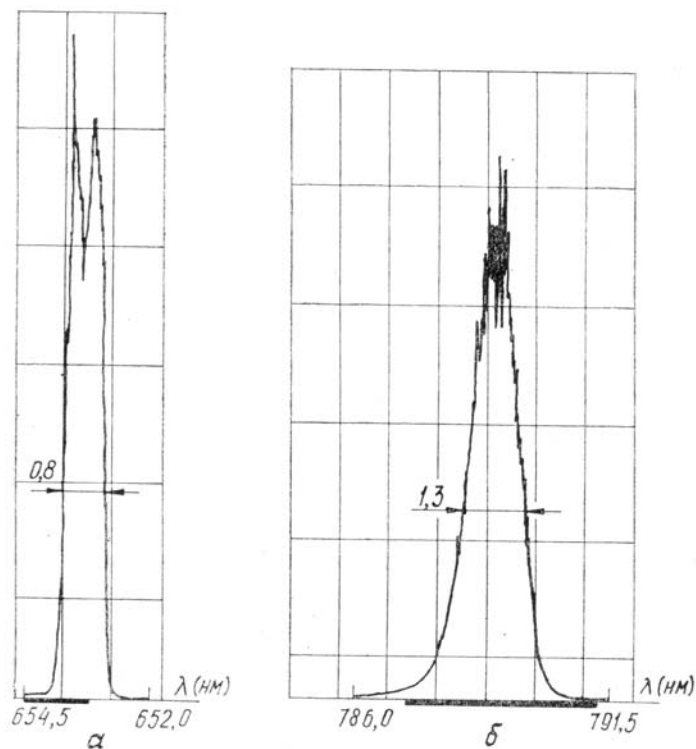


Рис. 3. Спектрограммы излучения лазеров на мощности накачки 30 Вт ОК-17 (а) и № 4501у (б). Жирные линии на осях абсцисс — окна прозрачности атмосферы

Лазер на красителе, используемый в описываемом многоцветном лидарном передатчике, построен по схеме с поперечной накачкой, что позволяет получить высокие коэффициенты преобразования излучения накачки в генерацию красителей. При уровне средней мощности накачки 30 Вт мощность генерации лазера на кристалле без спектральной селекции достигнет 9 Вт. Применяя плоскопараллельный резонатор и корректирующую линзу, можно получить требуемую расходимость, а введя пленочные интерферометры с базами 5; 15; 40 мкм — сузить спектр выходного излучения до 0,07 нм без заметного снижения мощности генерации красителя.

Поскольку для получения высоких энергетических характеристик в данной схеме излучение накачки и генерации красителя вертикально поляризовано, то с целью минимизации потерь все оптические элементы располагаются под углом, близким к углу Брюстера. Интерферометры имеют угловую подстройку в вертикальной плоскости для согласования по шкале частот функций пропускания.

Для преобразования излучения лазера на парах меди в УФ-диапазон (λ_4) использовался кристалл КДР без принудительного охлаждения размером 2×2×4 см (синхронизм типа «оо»). КПД преобразования излучения накачки (λ_1 и λ_2) в суммарную частоту достигал 5% при средней мощности УФ-излучения 0,9 Вт [11].

Конструктивно лидарный передатчик состоит из трех крупных блоков: специального виброзащищенного оптического стола, излучателя блоков питания лазеров накачки.

Излучатель включает в себя две лазерные системы «генератор—усилитель» на парах меди (оптическая схема приведена на рис. 1, диаметр канала генератора 15, усилителя — 27 мм), лазер на красителях, преобразователь на основе кристалла КДР и оптико-механический тракт их стыковки, позволяющий завести выходное излучение лазеров на входное зеркало передающего лидара. Все это размещено на оптическом столе из массивной мраморной плиты, покоящейся на опорах, состоящих из чередующихся слоев вибропоглощающих материалов с разными амплитудно-частотными характеристиками и выполняющих роль пассивной системы виброизоляции.

В заключение приведем основные технические характеристики лидарного передатчика:

длины волн излучения	$-\lambda_1 = 510,6$ нм; $\lambda_2 = 578,2$ нм; $-\lambda_3 = 654,0$ нм; $\lambda_4 = 271,2$ нм;
максимальная суммарная средняя мощность на λ_1 и λ_2 в каждом из двух каналов накачки	—15 Вт;
максимальная средняя мощность на λ_3	—менее 1 Вт;
максимальная средняя мощность на λ_4	—0,9 В;
ширина спектра лазерного излучения	— не более 1,0 нм;
частота следования импульсов	—5 кГц;
длительность импульсов лазерного излучения по полувысоте	—(25±30) нс;
расходимость излучения на уровне 0,5	— $5 \cdot 10^{-4}$ рад;
потребляемая мощность от сети (220/380 В, 50 Гц)	—20 кВт.

1. Зуев В.В., Романовский О.А. //ЖПС. 1986. Т. 45. № 6. С. 988—1003.
2. Наац И.Э. Метод обратной задачи в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1986. 198 с.
3. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M. et al. //In. Proc. Intern. Conf. «Lasers'82». New Orleans. 1982. P. 788—790.
4. Лазерный контроль атмосферы. //Под ред. З.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
5. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 151 с.
6. Кузьмина Е.Н., Потапов С.Е. //Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 5. С. 846—853.
7. Smilanski J., Erez G., Kerman A., Levin L.A. //Opt. Commun. 1979. V. 30. № 1. P. 136.
8. Anderson R.S. //Proc. Intern. Conf. «Lasers'79». USA. 1979. P. 17.
9. Масарновский Л.В., Солдатов А.Н., Суханов В.Б. //Квантовая электроника. 1979. Т. 6. № 7. С. 1536—1539.
10. Алексеева В.И., Бутаков А.Л., Копин В.Н. и др. //Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 99—114.
11. Полуниин Ю.П., Троицкий В.О. //Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 2249—2251.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
11 мая 1989 г.

A.L. Butakov, V.I. Voronov, G.S. Evtushenko, V.V. Zuev, A.E. Kirilov, A.N. Mal'tsev, S.Yu. Mirza, Yu.P. Polunin, V.B. Sukhanov, V.O. Troitskii.
Multicolor Laser Transmitter of a Lidar for Sensing the Atmosphere Parameters.

Some results of the investigations of multicolor laser based on the use of a nonlinear crystal and dyes pumped by the copper vapor laser radiation are presented in the paper. The laser transmitter described was designed for the use in a huge combined lidar with the mirror of 2 m diameter. The working wavelengths of the laser are 510.6 nm, 578.6 nm, 654.0 nm and 271.2 nm. The emission power at the first three wavelengths is not less than 1 W. The maximum mean power at green and yellow lines exceed 30 W. The red line emission power was about 9 W, while the UV line power is about 0.9 W.