

С.Э. Кунц, С.В. Мельченко, А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко

Эксплексные лазеры «ЛИДА» для исследования атмосферы

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 1.03.2001 г.

Обобщается опыт по созданию лидарных передатчиков на базе разработанных в лаборатории оптических излучений ИСЭ СО РАН эксплексных лазеров «ЛИДА». Описываются особенности применения лазеров «ЛИДА» для изучения атмосферы, приводятся зависимости эффективности преобразования УФ-излучения в другие спектральные диапазоны от различных параметров излучения эксплексного лазера. Показано, что лазеры данной серии могут эффективно использоваться при исследовании атмосферы методом дифференциального поглощения. При этом эксплексный лазер ($\lambda = 308$ нм) может служить как непосредственным источником зондирующего излучения, так и источником накачки лазеров на красителях и (или) ВКР-преобразования.

Введение

Современные успехи, так же как и дальнейшее развитие исследований в оптике атмосферы, связаны с созданием и дальнейшим совершенствованием лазерных лидарных систем дистанционного зондирования атмосферы. Наиболее широкое применение в исследованиях оптических характеристик атмосферы и атмосферного аэрозоля находят лидары, построенные на основе импульсных лазеров. При этом к передатчику лидарного комплекса предъявляются следующие требования: 1) генерация на заданных длинах волн; 2) стабильность энергии импульса; 3) высокий КПД лазера.

Эксплексные лазеры, являясь наиболее мощными источниками импульсного УФ-излучения, удовлетворяют всем этим параметрам и, кроме того, обладают достаточно широким спектром генерации, что также может рассматриваться как преимущество при решении задач мониторинга атмосферы методом дифференциального поглощения. Этот метод, основанный на измерении отношения интенсивностей рассеянного назад излучения от лазерных сигналов, генерируемых на двух длинах волн (одна из которых лежит в окне прозрачности атмосферы, а другая в полосе поглощения исследуемой примеси), является в настоящее время одним из наиболее распространенных при измерениях атмосферной концентрации промышленных выбросов (SO_2 , NO_2) и озона.

Очевидно, что наиболее перспективными являются лидары, позволяющие проводить измерения максимального количества примесей без значительных изменений в конфигурации лазера. Именно поэтому ширина спектра генерации эксплексных лазеров дает им преимущество: с одной стороны, современные методы спектральной селекции позволяют легко выделить узкую линию излучения на нужной длине волны, с другой стороны, длина волны может быть так же легко изменена путем перестройки по спектру излучения. Кроме того, эксплексные лазеры обладают достаточной мощностью, чтобы рассматривать их как эффективный источник преобразования излучения в

другие спектральные диапазоны методами нелинейной оптики и как источник накачки лазеров на красителях.

В данной статье обобщается опыт лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники в разработке эксплексных лазеров для зондирования атмосферы [1–3]. При этом лазеры могли применяться и как непосредственные лидарные передатчики, и как источники накачки нелинейных сред или сред лазеров на красителях.

Лазер «ЛИДА» для лидара по диагностике концентрации SO_2

Лазеры типа «ЛИДА» были разработаны в ИСЭ СО РАН как универсальные электроразрядные лазеры джоульного уровня энергии [4–7]. При этом основными для лазера являются смеси с эксплексными рабочими молекулами XeCl^* , XeF^* , KrCl^* , KrF^* , в то же время после незначительных переделок данный лазер может успешно использоваться и как источник ИК-излучения на молекулах HF , CO_2 и других [8].

Однако наиболее широко для зондирования атмосферы использовался XeCl -лазер, и в дальнейшем будем иметь в виду, что лазер «ЛИДА» работает на длине волны ~ 308 нм. Обобщенная конструкция лазера «ЛИДА» приведена на рис. 1, а.

В режиме свободной генерации спектр излучения XeCl -лазера состоит из четырех линий, соответствующих электронным переходам $B-X$. При этом линии переходов $0-1$ и $0-2$ обычно именуется «сильными», а линии переходов $0-0$ и $0-3$ – «слабыми», так как интенсивность первых в спектре на порядок превосходит интенсивность вторых (рис. 1, б, кривая 1).

Такая структура спектра оказалась очень удобной для измерения концентрации молекул SO_2 в атмосфере, так как $\lambda = 307,7$ нм («слабая» линия) лежит в окне прозрачности атмосферы, а $\lambda = 308,45$ нм («сильная» линия) попадает в полосу поглощения молекулы.

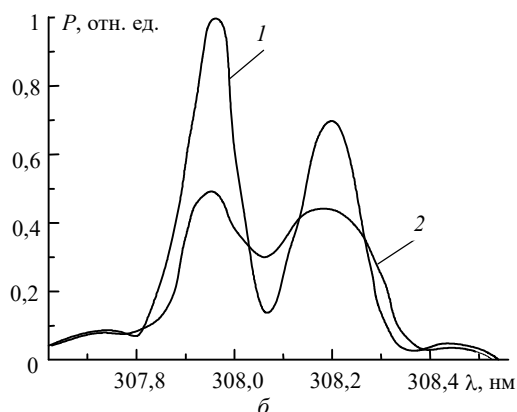
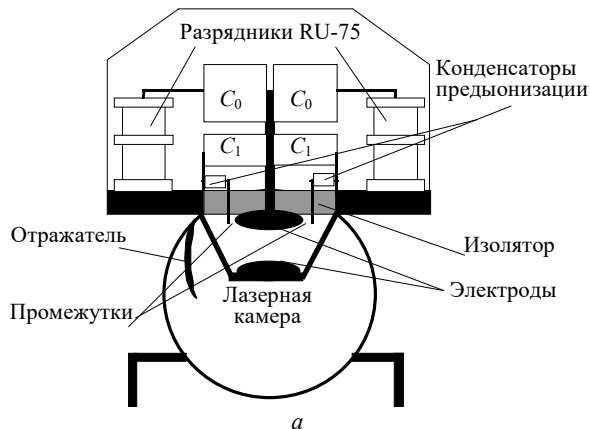


Рис. 1. Обобщенная схема конструкции лазера «ЛИДА» и структура спектра выходного излучения электроразрядного ХеСl-лазера в режиме свободной генерации (1) и с повышенной относительной интенсивностью слабых линий (2)

Однако при разработке дифференциального лидара пришлось решить ряд дополнительных проблем, связанных в первую очередь с получением узкополосного сигнала на длине волны слабой линии, контрастного по отношению к широкополосному шуму, развивающемуся из спонтанного излучения на длинах волн «сильных» линий спектра. Очевидно, получение достаточно мощного сигнала в этом случае возможно только при использовании системы «генератор–усилитель», однако и в этом случае она не является тривиальной. Были предприняты специальные исследования по влиянию параметров накачки на структуру выходного спектра ХеСl-лазера [9], в результате которых оказалось возможным сформулировать следующие требования:

- плотность мощности накачки должна превышать 1 МВт/см^2 , что должно обеспечить инкремент усиления $gL > 6$ (g – коэффициент усиления слабого сигнала; L – активная длина);
- длительность импульса накачки должна превышать время насыщения сильных переходов (для типичных параметров лазера $\sim 20 \text{ нс}$);
- концентрация ксенона в смеси должна в 1,5–2 раза превышать оптимальную с точки зрения максимальной выходной мощности.

Выполнение этих условий позволяет получить выходной спектр с повышенной относительной интенсивностью слабых линий (см. рис. 1, б, кривая 2), что и было реализовано в эксперименте. Но так как излучение на сильных линиях остается все же более интенсивным, для эффективного выделения узкой «слабой» линии из спектра требуется оптический резонатор, обладающий, с одной стороны, высокой селекцией, с другой – минимальными потерями в оптических элементах. Схема такого резонатора изображена на рис. 2.

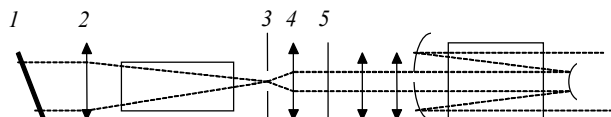


Рис. 2. Оптическая схема задающего генератора и усилителя, работающего в режиме инжекционной синхронизации, разработанная для получения мощного узкополосного, высококонтрастного излучения на длине волны «слабой» линии спектра молекулы ХеСl*

Дифракционная решетка 1 работает здесь в автоколлимационном режиме, обеспечивая в первом порядке дифракции коэффициент отражения 0,7, что сравнимо с алюминиевым зеркалом. Пространственная селекция излучения обеспечивается фильтром из длиннофокусной линзы 2 ($F = 2 \text{ м}$) и размещенной в ее фокусе диафрагмы 3 диаметром 30–100 мкм.

Из-за высоких плотностей мощности излучения, формируемого в резонаторе, выходное зеркало 5 было удалено от фокуса на 10 см и помещено после реколлимирующей линзы 4. Такая конфигурация резонатора позволила максимально использовать объем активной среды лазера ($3,5 \times 1,2 \times 60 \text{ см}$) и получить на выходе генератора энергии 3 мДж при ширине линии $0,25 \text{ \AA}$ ($\lambda = 307,7 \text{ нм}$) и 30 мДж при ширине линии $0,4 \text{ \AA}$ ($\lambda = 308,45 \text{ нм}$). При этом отношение сигнала к уровню шумов (контрастность) превышало 100 на расстоянии 2 м от выходного окна лазера, так как контрастность возрастает пропорционально квадрату расстояния.

Лазер «ЛИДА» также был использован и в качестве усилителя выделенного узкополосного сигнала. Было исследовано два режима усиления: однопроходный и режим инжекционной синхронизации. В последнем случае конкуренция между спонтанным шумом на длинах волн «сильных» линий и полезным сигналом на «слабой» линии в среде усилителя особенно критична.

Для обеспечения максимальной контрастности на выходе в этом случае оптимальная задержка между включением генератора и усилителя должна составлять $\sim 30 \text{ нс}$. Это позволяет получить превышение сигнала над шумом в 5–10 раз на расстоянии 2 м от выходного окна усилителя.

Более контрастное излучение было получено при использовании однопроходного режима усиления. При этом оказалось возможным повысить контрастность путем подбора геометрии распространения излучения в усилителе и при усилении расходящегося пучка получить контрастность равную 100 (табл. 1).

Данный режим был выбран как наиболее приемлемый для решения задачи зондирования и позволил получить в окончательном варианте 120 мДж при ширине линии $0,25 \text{ \AA}$ ($\lambda = 307,7 \text{ нм}$) и 250 мДж при ширине линии $0,4 \text{ \AA}$ ($\lambda = 308,45 \text{ нм}$). Оптимальная задержка между включением генератора и усилителя составила 5–10 нс.

Таблица 1

Энергия и контрастность на выходе однопроходного усилителя в зависимости от геометрии распространения усиливаемого пучка

Тип пучка	$E_0=0,3$		$E_0=3$		$E_0=15$		$E_0=30$	
	E_L	K	E_L	K	E_L	K	E_L	K
1	4	4	30	23	115	51	183	66
2	3	18	20	51	60	79	90	94
3	3,5	13	27	43	82	75	120	98
4	3	8	18	40	55	71	84	92

Примечание. E_0 , мДж, – входная энергия усилителя; E_L – выходная энергия усилителя; K – отношение сигнал-шум. 1 – параллельный пучок; 2 – пучок, сфокусированный в начале активной среды; 3 – пучок, сфокусированный за 30 см до начала активной среды; 4 – пучок, сфокусированный в середине активной среды усилителя.

Лазерная система МЖЛ для лидарной диагностики NO₂

Появление мощных эксиплексных лазеров дало гигантский толчок развитию мощных перестраиваемых лазеров на красителях. Лазерные системы на красителях с накачкой от эксиплексных лазеров способны генерировать излучение в диапазоне 430–550 нм со средней мощностью, в три раза превышающей таковую для аналогичных систем с накачкой Nd-YAG-лазерами [10]. Такие системы находят широкое применение в том числе и в области зондирования атмосферы. В частности, весьма актуальная, особенно для больших мегаполисов, задача определения концентрации NO₂ в атмосфере может быть решена с их помощью. Для этого требуются две длины волн: $\lambda = 446,9$ нм (в полосе поглощения) и $\lambda = 448,2$ нм (в полосе прозрачности атмосферы). Достаточно мощное и узкополосное излучение (150 мДж, 0,1Å) было получено на этих длинах волн в лазерной системе МЖЛ на красителях (кумарин-2) (рис. 3).

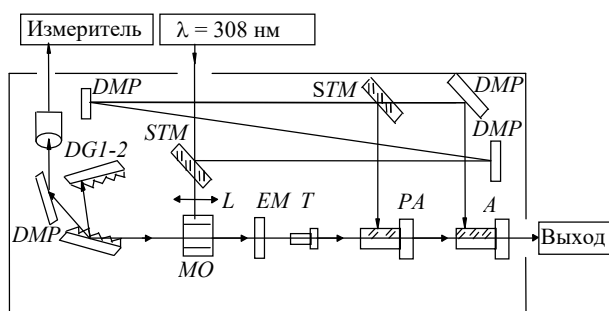


Рис. 3. Блок-схема лазерной системы на красителях МЖЛ [3]. MO, PA, A – генератор, предусилитель и усилитель соответственно; STM – полупрозрачное зеркало; DMP – полностью отражающие зеркала; DGI-2 – дифракционные решетки; EM – выходное зеркало генератора MO; T – телескоп; L – цилиндрическая линза

Данная лазерная система была разработана в лаборатории лазерной физики Сибирского физико-технического института им. В.Д. Кузнецова при Томском государственном университете специально под накачку эксиплексным лазером «ЛИДА». При этом была исследована эффективность конверсии в зависимости от длительности лазерного импульса накачки (рис. 4).

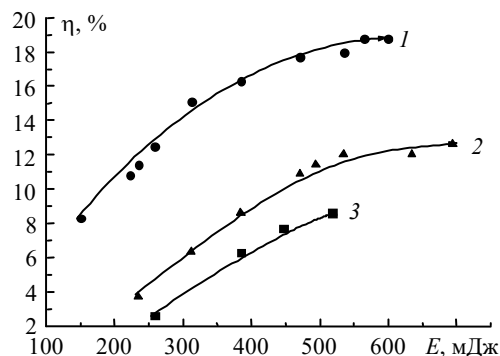


Рис. 4. Эффективность лазера МЖЛ-03 в зависимости от энергии накачивающего XeCl-лазера при длительности импульса последнего 40 (1), 55 (2) и 75 нс (3) [3]

Оказалось, что эффективность конверсии снижается с удлинением импульса. Это можно объяснить несогласованием оптической задержки внутри МЖЛ лазера (времени между возникновением генерации в генераторе и приходом импульса накачки на усилители). Дело в том, что генератор лазера МЖЛ был разработан под импульс накачки с длительностью ~40 нс и крутизной переднего фронта ~10–15 нс и изменение этих параметров до 75 и 30 нс соответственно требует увеличения оптической задержки и, следовательно, изменений в оптической схеме лазера.

Как показали исследования по влиянию расходимости импульса накачки на эффективность МЖЛ лазера, такие параметры излучения эксиплексного лазера, как расходимость и апертура, также имеют важное значение при использовании его для накачки лазеров на красителях.

Очевидно, что апертура пучка накачки, приходящего на усилители, должна совпадать с их входной апертурой, а значит, расходимость излучения должна быть достаточно малой для того, чтобы за время прохождения оптической задержки апертура излучения не превысила указанного значения (в нашем случае это 48×16 мм, что соответствует расходимости 3×1,5 мрад). Результаты данных исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2

Полная энергия накачки лазера МЖЛ-3 – E_p^{XeCl} , мДж, входные энергии составных частей лазера МЖЛ-3 – E_p^{MO} , E_p^{PA} и E_p^A и КПД лазера на красителях. Длительность импульса XeCl-лазера $\tau_p = 40$ нс

E_p^{XeCl}	E_p^{MO}	E_p^{PA}	E_p^A	η , %
390	59	117	215	13
195	28,5	58	108	7,8
283	42,5	85	156	11,8
283	59	117	107	7

На базе лазеров «ЛИДА» (генератор и усилитель) и лазерной системы МЖЛ в НПО космического приборостроения (НПО КП), г. Москва, был разработан лидарный комплекс по измерению концентрации примесей SO₂ и NO₂. При измерении первого вида примесей должны были работать только эксиплексные лазеры, при измерении концентрации NO₂ излучение XeCl-лазеров использовалось для накачки системы МЖЛ. Данный лидарный комплекс с

1997 г. успешно используется НПО КП для мониторинга NO_2 в воздушном бассейне г. Москвы [3].

ВКР-преобразование излучения эксиплексных лазеров

Помимо накачки лазеров на красителях, излучение эксиплексных лазеров может быть конвертировано в другие спектральные диапазоны различными методами нелинейной оптики. Наиболее распространенным и эффективным способом такой конверсии является вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) в сжатых газах и парах металлов. ВКР позволяет получить набор спектральных компонент, сдвинутых относительно друг друга на величину колебательного кванта среды рассеяния и сохраняющих все пространственные характеристики излучения накачки. Очевидно, что такая форма спектра является идеальной для дистанционного зондирования, если удастся подобрать нужную пару длин волн.

Наиболее широкое применение $\text{XeCl}(\text{XeF})$ -лазеры с ВКР-преобразованием излучения нашли при мониторинге стратосферного озона [11, 12]. В самом деле, поглощающая длина волны здесь $\lambda = 307,9$ нм, а попадающая в полосу прозрачности $\lambda = 353,2$ нм, что соответствует первой стоксовой компоненте при рассеянии в водороде. В случае необходимости ВКР-ячейка в таком лидаре может быть заменена XeF -лазером с $\lambda = 351$ нм.

Хотя работы такого рода (создание лидаров на базе ВКР-преобразования) и не проводились непосредственно в лаборатории оптических излучений ИСЭ СО РАН, нами накоплен большой опыт по использованию лазеров типа «ЛИДА» как источника накачки ВКР [13], что позволяет рассматривать эти лазеры как перспективные и в этом направлении.

Излучение эксиплексных лазеров имеет некоторые особенности: во-первых, достаточно широкий спектр; во-вторых, высокую расходимость выходного пучка, обусловленную малым числом обходов резонатора. Как было выяснено еще в [14], ширина спектра накачки не важна с точки зрения эффективности ВКР, если плотность мощности в фокальной области линзы (области преобразования) превышает критическое значение (~ 40 МВт/см²). Расходимость же излучения как раз и определяет однородность распределения интенсивности в фокальном пятне и сильно влияет на эффективность преобразования (рис. 5).

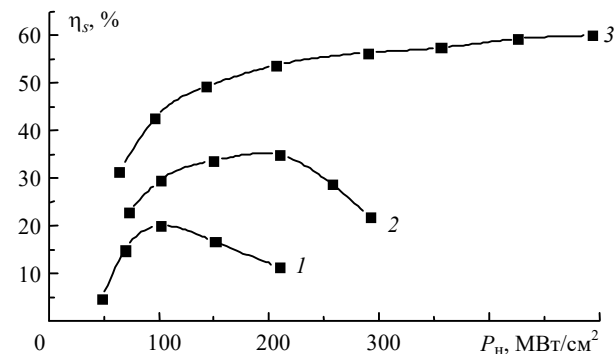


Рис. 5. Зависимость эффективности ВКР-преобразования в стоксову область от плотности мощности накачки при расходимости лазерного излучения ($\lambda = 308$ нм) 1 (1), 0,6 (2) и 0,4 мрад (3). Давление водорода 20 атм [13]

Таким образом, на выходе лазера предпочтительнее формировать излучение с расходимостью, близкой к дифракционной, для чего обычно используются неустойчивые резонаторы, что, в свою очередь, приводит к падению выходной энергии и требует создания лазерных систем «генератор–усилитель». При использовании пучка накачки высокого качества максимальная суммарная квантовая эффективность преобразования в стоксовы компоненты достигает 90% уже при энергии ~ 20 мДж. Распределение энергии между компонентами определяется длиной зоны взаимодействия (геометрией фокусировки) и параметрами активной среды. Следовательно, варьируя условия эксперимента, можно получить доминирование в спектре той или иной компоненты (как правило, речь идет о первых трех основных стоксовых компонентах).

При использовании затравочного сигнала на нужной длине волны эффективность преобразования в данную компоненту может возрастать до 95–97%. Все описанные выше исследования (включая ВКР в водороде, метане, их смеси и ВКР в парах свинца) были систематически проведены в лаборатории оптических излучений ИСЭ СО РАН в 1980–2000 гг. В ходе исследований была разработана соответствующая экспериментальная техника и получен ряд рекордных на тот момент эффективностей преобразования [15–17].

В заключение отметим, что помимо зондирования методом дифференциального поглощения лазеры ультрафиолетового диапазона широко применяются при исследовании атмосферы в методах обратного упругого рассеяния, измерения вертикального распределения температуры и пр. (см., например, [18]). Параметры лазеров «ЛИДА» делают их перспективными и для этих измерений, при этом возможно как наземное, так и воздушное (космическое) базирование лазерного передатчика.

1. Gochelashvili K.S., Kabanov M.V., Kaul V.B., Kopylova T.N., Maier G.V., Mel'chenko S.V., Panchenko A.N., Prokhorov A.M., Tarasenko V.F., Tel'minov E.N. Model Laser system for Ecological Lidar // Laser Phys. 1992. V. 2. N 5. P. 802–804.
2. Kaul V.B., Kunts S.E., Mel'chenko S.V., Tarasenko V.F. High-Power Low-Divergence Narrow band XeCl-Laser system // Proc. Conf. Lasers'97: STS Press. 1998. P. 761–764.
3. Tarasenko V.F., Baksh E.H., Kopylova T.N., Kunts S.E., Kuznetsova R.T., Maier G.V., Mel'chenko S.V., Onitschenko A.L., Panchenko A.N., Samsonova L.G., Svetlichnyi V.A., Tel'minov E.N. Laser system: powerful XeCl*-laser – dye laser for the atmosphere ecological monitoring // Proc. Conf. Lasers'98: STS Press. 1999. P. 525–532.
4. Mel'chenko S.V., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. High-power Raman conversion of a discharge XeCl-laser // Opt. Commun. 1985. V. 56. N 1. P. 51–52.
5. Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Электроразрядный KrCl-лазер с энергией излучения 0,6 Дж // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып 3. С. 171–175.
6. Верховский В.С., Ломаев М.И., Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Управление энергетическими, временными и пространственными характеристиками излучения XeCl-лазера // Квант. электрон. 1991. Т. 18. № 11. С. 1279–1285.
7. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Компактный электроразрядный XeCl-лазер с энергией излучения ~ 1 Дж и длительностью импульса 100–300 нс // Квант. электрон. 1993. Т. 20. № 7. С. 663–664.
8. Baksh E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. Discharge laser pumped by generators with inductive energy storage // IEEE J. Quantum Electron. 1999. V. 35. N 3. P. 261–266.
9. Кауль В.Б., Куц С.Э., Мельченко С.В. Интенсивность насыщения и спектр выходного излучения XeCl-лазера // Квант. электрон. 1995. Т. 22. № 6. С. 555–558.

10. Artykhov V.Ya., Sokolova I.V., Kopylova T.N., Maier G.V., Tarasenko V.F. Development and desing of powerful excimer laser-pumped dye lasers // Proc. Conf. Lasers'94: STS Press. 1995. P. 208–215.
11. McDermid J.S., Walsh T.D., Deslis A., White M.L. Optical systems design for a stratospheric lidar system // Appl. Opt. 1995. V. 34. N 27. P. 6201–6210.
12. Kempfer V., Karnuth W., Lotz R., Trickl T. A wide-range ultraviolet lidar system for tropospheric ozone measurements: development and application // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. P. 3145–3164.
13. Мельченко С.В., Тарасенко В.Ф. ВКР-преобразование излучения мощных УФ-лазеров в газах и парах // Изв. вузов. Физ. 1998. № 3. С. 90–116.
14. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Павлов Л.И. Статистические явления при возбуждении вынужденного комбинационного рассеяния накачкой с широким спектром // Ж. эксперим. и теор. физ. 1974. Т. 66. № 2. С. 520–536.
15. Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. ВКР-преобразование излучения электроразрядного ХеСl-лазера // Квант. электрон. 1986. Т. 13. № 7. С. 1496–1500.
16. Evtushenko G.S., Mel'chenko S.V., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. Investigation of SRS conversion of ХеСl-laser emission in lead vapor, methane and hydrogen // J. Russian Laser Res. 1994. V. 15. N 1. P. 49–54.
17. Кауль В.Б., Куниц С.Э., Мельченко С.В. ВКР-преобразование излучения ХеСl-лазера в смещенные стоксовы компоненты // Квант. электрон. 1998. Т. 25. № 1. С. 65–68.
18. Raimondi V., Cecchi G., Pantani L., Chiari R. Fluorescence lidar monitoring of historic buildings // Appl. Opt. 1998. V. 37. N 6. P. 1089–1098.

S.E. Kunts, S.V. Mel'chenko, A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko. Exciplex lasers «LIDA» for atmosphere investigation.

The present article summarizes experience in development of laser lidar sources based on exciplex «LIDA» lasers developed in the Laboratory of optical radiations at HCEI. Peculiarities of application of the «LIDA» lasers for atmosphere sensing are presented. Efficiency of the UV-radiation ($\lambda = 308$ nm) conversion into other spectral regions by means of dye lasers and stimulated Raman scattering (SRS) is studied as a function of the UV-radiation divergence and the «LIDA» laser pulse duration. Therewith, in the lidar systems the «LIDA» lasers can be used as sources of sensing radiation and/or for pumping of dye and /or Raman lasers.