

## Генераторы комбинационных частот эрбиевых и $\text{CO}_2$ -лазеров в задачах лидарного зондирования метеопараметров атмосферы

Ю. М. Андреев, П. П. Гейко

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск, Россия

Г. Г. Матвиенко, О. А. Романовский, О. В. Харченко

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия

*Проведенные исследования генераторов комбинационных частот излучения эрбиевых и  $\text{CO}_2$ -лазеров на основе нелинейных кристаллов  $\text{ZnGeP}_2$  и  $\text{CdSe}$  показали перспективность их применения для решения задач оптического мониторинга атмосферы в средней ИК-области спектра. Численное моделирование лидарного зондирования высотных профилей метеопараметров атмосферы показало, что ошибки восстановления профилей температуры и влажности имеют приемлемые значения во всем диапазоне высот 0—2 км.*

Необходимость соблюдения требований международных стандартов здравоохранения [1] по отношению к лидарам, предназначенным для контроля окружающей среды, в том числе метеорологических параметров атмосферы, приводит к целесообразности использования источников лазерного излучения, функционирующих в безопасной для глаз средней ИК-области спектра.

Наиболее привлекательными для решения задач атмосферной оптики в силу минимальности ослабления излучения [2] и наличия высокочувствительных детекторов на основе  $\text{InAs}$  и  $\text{InSb}$  [3] являются окна прозрачности атмосферы в районе 2,0—2,4 и 3,4—4,2 мкм, но распространенные источники когерентного излучения малопригодны для одновременного освоения этих спектральных диапазонов. Известные параметрические генераторы света обладают плохими эксплуатационными характеристиками [4], полупроводниковые лазеры с одиночной линией излучения — низкими энергетическими параметрами и ограниченным диапазоном перестройки [5]. На наш взгляд, перспективными являются источники излучения на основе перестраиваемых  $\text{CO}_2$ -лазеров и беспороговых параметрических преобразователей частоты: генераторов гармоник [6], генераторов суммарных частот  $\text{CO}_2$ - и  $\text{CO}$ - [7], а также  $\text{CO}_2$ - и  $\text{HF}$ -лазеров [8]. Упомянутые источники, включая генератор разностных частот излучений  $\text{Nd:YAG}$ - и  $\text{CO}_2$ -лазеров, способны перекрыть отдельные участки рассматриваемых окон прозрачности атмосферы, надежны и имеют высокие выходные энергетические параметры.

В данной работе предлагаются и исследуются генераторы суммарных и разностных частот излучения  $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ -,  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ - и непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазеров на основе нелинейных кристаллов  $\text{ZnGeP}_2$  и  $\text{CdSe}$  и проводится численное моделирование лидарного зондирования метеорологических параметров атмосферы по методу дифференциального поглощения (МДП). Как видно из рис. 1, на котором изображен спектр пропускания приземной атмосферы и области генерации суммарных и разностных частот излучения эрбиевых и  $\text{CO}_2$ -лазеров, они перекрывают большую часть окон прозрачности атмосферы средней ИК-области спектра.

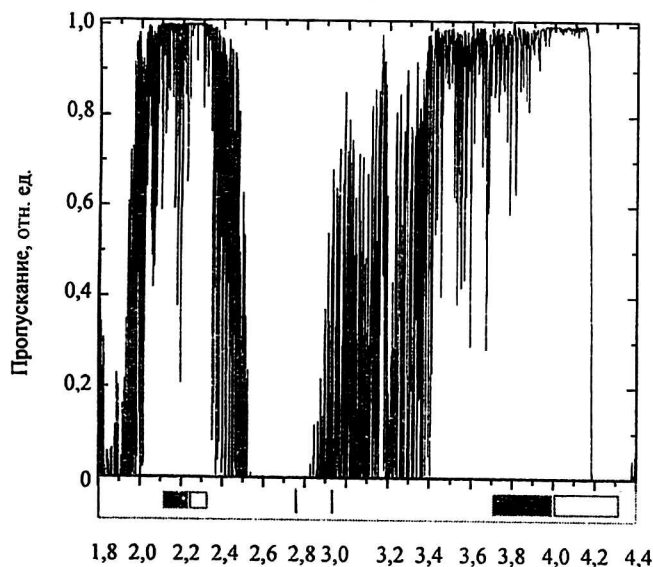


Рис. 1. Спектр пропускания приземной атмосферы и области генерации суммарных и разностных частот излучения  $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ -,  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ - и непрерывных  $\text{CO}_2$ -лазеров

### Генераторы комбинационных частот эрбиевых и CO<sub>2</sub>-лазеров

Нелинейный оптический элемент для суммирования частот изготовлялся из кристалла CdSe, характеризующегося коэффициентом оптических потерь  $\alpha = 0,06 \text{ см}^{-1}$  на длинах волн излучения эрбиевых лазеров и  $0,03 \text{ см}^{-1}$  — в области генерации CO<sub>2</sub>-лазеров. Генераторы разностных частот изготовлялись из кристаллов ZnGeP<sub>2</sub>. При той же коротковолновой границе прозрачности, как и CdSe —  $0,75 \text{ мкм}$ , кристалл ZnGeP<sub>2</sub> имел так называемое коротковолновое плечо поглощения с уровнем оптических потерь в области  $2,1\text{--}2,3 \text{ мкм}$   $\alpha = 0,15\text{--}0,1 \text{ см}^{-1}$ . Для различных линий излучения CO<sub>2</sub>-лазеров  $\alpha = 0,3\text{--}0,6 \text{ см}^{-1}$  из-за наличия трехфононного пика поглощения. Коэффициент качества  $M \approx d^2/n^3$  (где  $d$  — коэффициент квадратичной нелинейной восприимчивости,  $n$  — показатель преломления), пропорциональный эффективности преобразования, у кристаллов ZnGeP<sub>2</sub> выше, чем у CdSe. Кроме того, у CdSe отсутствует возможность реализации I типа взаимодействия.

На рис. 2 представлена оптическая блок-схема экспериментальной установки по генерации комбинационных частот. В наших исследованиях использовались Er<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub>- и Er<sup>3+</sup>:YAG-лазеры, работающие при комнатной температуре. Длина активных элементов диаметрами 7 и 8 мм с плоскопараллельными торцами равнялась 150 и 100 мм, соответственно.

Полуконфокальные резонаторы длиной 1 м были образованы плоскими зеркалами с коэффициентами отражения 50 и 65, а также сферическими зеркалами с радиусом кривизны 2 м с коэффициентом отражения 100 %.

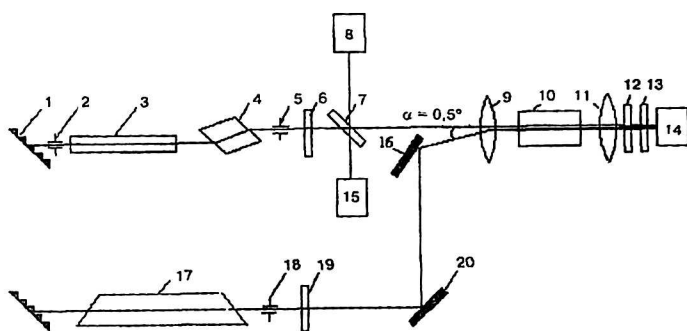


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки:

- 1 — дифракционная решетка с 200 штр./мм; 2, 5, 18 — внутрирезонаторные диафрагмы; 3 — Er<sup>3+</sup>-стержень; 4 — поляризатор из LiNbO<sub>3</sub>; 6, 19 — выходные зеркала лазеров; 7 — делительная пластинка; 8 — He-Ne-лазер; 9, 11 — линзы из ZnSe; 10 — нелинейный кристалл; 12 — четыре SiO<sub>2</sub>-фильтра, расположенных под углом Брюстера; 13 — металлодисперсионный фильтр; 14 — InSb-детектор; 15 — измеритель мощности ИМО2-Н; 16, 20 — поворотные зеркала; 17 — кювета CO<sub>2</sub>-лазера

Энергия одиночных 1,5 мс импульсов 2,76 мкм излучения Er<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub>-лазера в режиме свободной генерации достигала 5 Дж, с распределением поля соответствующим TEM<sub>00</sub> моде, — около 1 Дж. Генерация 2,94 мкм излучения Er<sup>3+</sup>:YAG-лазера происходила на переходе между штарковскими компонентами  $x_2$  уровня  $^4I_{11/2}$  и  $y_7$  уровня  $^4I_{13/2}$ . Поляризация излучения обоих лазеров осуществлялась помещением в резонаторы оптических элементов из LiNbO<sub>3</sub> с торцами, вырезанными под углом Брюстера. При необходимости они могли быть использованы как электрооптические затворы. Спектр выходного излучения состоял из 10—12 и 8—10 отдельных линий, соответственно, перекрывающих спектральные диапазоны шириной около 50 и 10 см<sup>-1</sup>.

Непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер низкого давления монтировался на инваровых стержнях. При распределении поля излучения, соответствующего TEM<sub>00</sub> моде, и при перестройке по линиям излучения в области 10,6 мкм его выходная мощность достигала 15 Вт. Спектральная ширина линий излучения  $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ . При проведении экспериментов генерация суммарных частот исследовалась в обоих кристаллах, причем разрушений в последних при накачке излучением эрбиевых лазеров с интенсивностью 8—10 МВт/см<sup>2</sup> не отмечалось.

Генерация в ZnGeP<sub>2</sub> суммарных частот излучений Er<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub>-, Er<sup>3+</sup>:YAG- и CO<sub>2</sub>-лазеров наблюдалась при углах синхронизма  $\theta = 52^\circ 10'$  и  $52^\circ 50'$ , соответственно. Внешняя угловая ширина синхронизма по полувысоте составила  $1^\circ 40'$  и  $1^\circ 20'$ , соответственно.

Генерация разностных частот в ZnGeP<sub>2</sub>, как и ожидалось, зафиксирована при близких углах синхронизма ( $\theta = 49^\circ 30'$  и  $51^\circ 20'$ ) практически с той же угловой шириной синхронизма. При определенном положении кристалла возникала одновременная генерация суммарной и разностной частот. Поскольку эти процессы являются конкурирующими и условия синхронизма выполнялись неточно, нам удалось зарегистрировать лишь сам факт одновременной генерации. В CdSe генерация разностных частот этих излучений наблюдалась при  $72^\circ 40'$  с угловой шириной синхронизма  $1^\circ 16'$ . Значения углов синхронизма в ZnGeP<sub>2</sub> рассчитывались по собственным константам (табл. 1) уравнений Сельмейера вида

$$(n^{o,e})^2 = A^{o,e} + B^{o,e} \lambda^2 / (\lambda^2 - C^{o,e}) + D^{o,e} \lambda^2 / (\lambda^2 - E^{o,e}),$$

а для расчета углов синхронизма в CdSe использовались данные работы [9].

Таблица 1

Константы уравнений Сельмейера в области спектра 1—12 мкм при температуре 300 К

ZnGeP <sub>2</sub>	A	B	C	D	E
O	3,64294	6,09656	0,11748	1,87400	800
E	3,52299	6,45128	0,12086	1,80407	800
CdSe					
O	4,2243	1,7680	0,2270	3,1200	3380
E	4,2009	1,8875	0,2171	3,6461	3,6929

Примечание. Обозначение "O" — обыкновенная волна, "E" — необыкновенная.

Строгие расчеты эффективности преобразования частот с учетом многочисленных сопутствующих факторов довольно затруднительны. Но в случае приближения заданного поля волн накачки  $\omega_1$  и  $\omega_2$  можно оценить энергетическую эффективность преобразования

$$\eta = \frac{I_3}{I_1^0} = \frac{8\pi^2 d_{aa}^2 L^2 I_2}{\epsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2} \sin^2(x),$$

$$x = \frac{|\Delta k|}{2} L = \pi L \left| \frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_2}{\lambda_2} - \frac{n_1}{\lambda_1} \right|,$$

где  $\lambda_3$  — длина волны генерируемого излучения;

$L$  — длина кристалла;

$n_{1,2,3}$  — показатели преломления.

Эффективность генерации разностных частот была выше при использовании монокристаллов CdSe и достигала 12 % от энергии излучения эрбиевого лазера. Эффективность генераторов комбинационных частот на основе ZnGeP<sub>2</sub> составила 1,5—2,0 при накачке Er<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub>-лазером и до 3 % — при накачке Er<sup>3+</sup>:YAG-лазером. При хорошем соответствии измеренных и рассчитанных углов синхронизма реализованная эффективность преобразования оказалась в полтора раза ниже оценочных значений. Основной причиной этого, по-видимому, является сложность учета спектрального состава излучения эрбиевых лазеров.

Кристаллы ZnGeP<sub>2</sub> имеют значительно большую теплопроводность, чем кристаллы CdSe: 0,36 против 0,069 Вт/см·К [9]; независящее от температуры кристалла изменение двулучепреломления [10]; большую лучевую стойкость и преимущества по другим физическим свойствам, определяющим условия эксплуатации и надежность работы.

Из решения системы укороченных уравнений совместно с уравнением теплопроводности, с соответствующими начальными и граничными условиями [11] по методике [12] следует, что

ZnGeP<sub>2</sub> является абсолютным лидером в генерации рассматриваемых частот при длине кристаллов < 2,5 см. Конкуренцию ему могут составить кристаллы Tl<sub>3</sub>AsSe<sub>3</sub>, AgGaSe<sub>2</sub>, CdSe и GaSe большой (до 8—10 см) длины. Но следует учесть большое двулучепреломление кристаллов Tl<sub>3</sub>AsSe<sub>3</sub> и GaSe,  $B = -0,18$  и  $-0,375$ , соответственно, а также заметное ( $-0,033$ ) двулучепреломление AgGaSe<sub>2</sub>, сильно ограничивающее максимальную длину используемых кристаллов при смешении малоапертурных пучков. Поэтому кристаллы CdSe с учетом их спектральных характеристик и малым  $B = 0,01$  являются потенциально самыми сильными конкурентами ZnGeP<sub>2</sub> при генерации разностных частот излучения малоапертурных эрбиевых и CO<sub>2</sub>-лазеров.

### Численное моделирование лидарного зондирования метеорологических параметров атмосферы

Полученные результаты и перспективы дальнейшего увеличения эффективности генерации комбинационных частот за счет оптимизации параметров лазеров накачки и нелинейных элементов обеспечивают их использование для решения задач оптики и спектроскопии атмосферы, в том числе лидарного зондирования метеорологических параметров атмосферы по МДП в среднем ИК-диапазоне спектра.

В этом диапазоне спектра присутствуют линии поглощения водяного пара, пригодные для лидарного зондирования температуры и влажности атмосферы по трехчастотному МДП [13].

В настоящей работе на основе критериев, предложенных в работе [14], и данных о спектральных параметрах линий поглощения из [15], был проведен поиск длин волн зондирования, пригодных для определения профилей метеорологических параметров с помощью лидарной системы, функционирующей в безопасной для глаз области спектра 2 мкм. Результаты этого поиска приведены в табл. 2 [15].

Таблица 2

Спектральные параметры линий поглощения водяного пара

Номер линии	$\lambda$ , мкм	$S_0$ , см/г	$\gamma_0$ , см <sup>-1</sup>	$E'$ , см <sup>-1</sup>
1	2,0939	0,144	0,092	79,496
2	2,0926	0,023	0,088	542,906
3	2,0900	0,060	0,091	142,278
4	2,0886	0,023	0,042	1446,129

Примечание.  $\lambda$  — длина волны;  $S_0$ ,  $\gamma_0$  и  $E'$  — интенсивность, полуширина и энергия нижнего состояния колебательно-вращательного уровня при температуре  $T_0 = 293$  К и давлении  $P_0 = 1,013 \cdot 10^3$  ГПа, соответственно.

Наиболее перспективным, с нашей точки зрения, является использование пары линий поглощения 1 и 2 (см. табл. 2) в качестве основных при зондировании температуры несмотря на небольшое значение разности энергий нижнего состояния поглощающих переходов около  $463 \text{ см}^{-1}$ . Зондирование в линиях с большей разностью энергий нижнего состояния оказывается малоэффективным из-за слабого коэффициента поглощения на переходе с невысоким значением  $E''$  (линия 3 с интенсивностью поглощения  $0,06 \text{ см}^2/\text{г}$ ), что приводит к резкому снижению чувствительности лидарных измерений (пара линий 3 и 4).

Концентрация водяного пара  $\rho(h)$ , усредненная по интервалу высот  $\Delta h$ , как известно [16], определяется из соотношения

$$\rho(h) = \frac{\alpha_1(h)}{K_1(h) - K_0(h)}; \quad (1)$$

$$\alpha_1(h) = \frac{1}{2\Delta h} \ln \left( \frac{U_1(h)U_0(h + \Delta h)}{U_1(h + \Delta h)U_0(h)} \right), \quad (2)$$

где  $K_i(h)$  — коэффициент поглощения на длинах волн в центре ( $i = 1$ ) и вне контура ( $i = 0$ ) выбранной линии поглощения водяного пара на высоте  $h$ , рассчитанный на основе априорной информации о распределении термодинамических параметров атмосферы и спектрального состава лазерного излучения;

$U_i(h)$  и  $U_i(h + \Delta h)$  — принимаемые лидарные сигналы из зондируемых объемов атмосферы, удаленных на расстояние  $h$  и  $h + \Delta h$  от лидара на соответствующих длинах волн.

В трехчастотной схеме зондирования две линии излучения лазера строго совмещаются с двумя достаточно близкими линиями поглощения водяного пара с различной температурной зависимостью, а третья линия излучения расположена в ближайшем "микроокне прозрачности".

Профиль температуры может быть получен из следующего соотношения [17]:

$$T(h) = T_0 \frac{A}{\ln C - \ln E(h)}; \quad (3)$$

$$A = \frac{E_1'' - E_2''}{kT_0}; \quad C = \frac{S_{01}\gamma_{02}}{S_{02}\gamma_{01}} \exp(A); \quad E(h) = \frac{\alpha_1(h)}{\alpha_2(h)},$$

где  $E_j''$ ,  $S_{0j}$  и  $\gamma_{0j}$  ( $j = 1, 2$ ) — энергия нижнего колебательно-вращательного уровня, интенсивность и полуширина при температуре  $T_0$  и давлении  $p_0$  для 1-й и 2-й линий поглощения водяного пара, соответственно.

Коэффициент ослабления  $\alpha_2(h)$  определяется аналогично  $\alpha_1(h)$  (см. (2)).

Полученные значения температуры далее используются в расчете профилей коэффициентов поглощения при определении профилей водяного пара по формуле (1).

Для исследования возможностей зондирования было проведено численное моделирование восстановления профилей основных метеорологических параметров атмосферы, при этом использовались следующие параметры лидара: энергия лазерного излучения  $10 \text{ мДж}$ , диаметр приемного телескопа  $20 \text{ см}$ . Сигналы рассчитывались с пространственным разрешением  $200 \text{ м}$ . Число циклов накопления составляло  $1000$  импульсов, что при частоте  $10 \text{ Гц}$  соответствует времени накопления  $1,5 \text{ мин}$ . Расчеты проводили для условий ночной атмосферы и чистого неба, профили коэффициентов поглощения рассчитывали для фойгтовского контура с учетом поглощения крыльями соседних линий.

При моделировании применялись аэрозольные характеристики и профили метеопараметров атмосферы из модели [18], высотный ход индикатрисы рассеяния — из модели Крекова и Рахимова [19], спектральные параметры линий поглощения водяного пара 1 и 2 — из табл. 2.

Для оценки точностных характеристик лидара рассматривались погрешности восстановления профилей температуры и влажности, обусловленные как систематическими ошибками лидарного МДП, так и случайными при регистрации лидарных сигналов.

Систематические ошибки, возникающие за счет погрешностей предварительного расчета профиля эффективного коэффициента поглощения, зависят от многих факторов, к которым относятся вариации метеопараметров и концентраций газов вдоль трассы зондирования, сдвиг центров линий поглощения атмосферных газов давлением воздуха, доплеровское уширение обратно рассеянного сигнала от хаотично движущихся молекул воздуха. Влияние этих факторов на результаты зондирования и пути его минимизации для видимого и среднего ИК-спектральных диапазонов проанализированы в [20]. Там же показано, что наиболее существенным фактором, влияющим на точность расчета коэффициента поглощения, является нестабильность спектральных параметров линии лазерного излучения.

Нами проанализировано влияние ширины линии лазерного излучения на значение коэффициента поглощения, используемого для восстановления профилей температуры в безопасной для глаз области спектра  $2 \text{ мкм}$ .

В реальных схемах зондирования высотные профили коэффициентов поглощения могут быть представлены в виде эффективных величин, усредненных по спектру лазерного излучения

$$K_{эф}(v_1, z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I(v_1, v) T_{ma}^2(v, z) K(\theta, z) dv}{\int_{-\infty}^{\infty} I(v_1, v) T_{ma}^2(v, z) dv},$$

где  $K(v, z)$  — профили монохроматических коэффициентов поглощения;

$I(v_1, v)$  — спектральное распределение мощности зондирующего импульса лазерного излучения;

$T_{ma}^2(v, z)$  — квадрат пропускания, который в случае учета молекулярного поглощения исследуемым газом определяется выражением

$$T_{ma}^2(v, z) = \exp\left[-2 \int_0^z \alpha_{ma}(v, z') dz'\right],$$

где  $\alpha_{ma}(v, z)$  — профиль объемного коэффициента ослабления лазерного излучения за счет молекулярного поглощения.

Расчеты систематических ошибок определения профилей температуры по МДП были проведены с использованием выражений (2, 3) для диапазона высот 0—3 км и трех значений ширины линии лазерного излучения  $\Delta v_e$  (0,01; 0,03 и 0,05  $\text{см}^{-1}$ ). Абсолютная ошибка восстановления профилей температуры, полученных при различных  $\Delta v_e$ , приведена в табл. 3, из которой видно, что ошибка находится в пределах 0,04; 0,34 и 0,89 К при  $\Delta v_e = 0,01; 0,03$  и 0,05  $\text{см}^{-1}$ , соответственно, т. е. не выходит за пределы 1 К при  $\Delta v_e \leq 0,05 \text{ см}^{-1}$  в приземном слое атмосферы.

Таблица 3

Абсолютная ошибка восстановления профилей температуры, полученных при различных значениях ширины линии лазерного излучения  $\Delta v_e$

h, км	$\Delta v_e, \text{ см}^{-1}$		
	0,01	0,03	0,05
0	0,025	0,225	0,601
0,5	0,027	0,244	0,649
1,0	0,030	0,263	0,697
1,5	0,032	0,283	0,745
2,0	0,034	0,302	0,793
2,5	0,037	0,321	0,841
3,0	0,039	0,340	0,891

Для оценки случайных ошибок регистрации лидарных сигналов в процессе численного эксперимента было проведено зашумление лидарных сигналов с помощью генератора случайных чисел, обеспечивающего равномерное распределение шумовой компоненты с амплитудой, эквивалентной дробовым шумам реального лидарного сигнала.

Результаты расчетов случайных ошибок восстановления профилей влажности приведены на рис. 3 для атмосферных моделей лета (а) и зимы (б) средних широт. Видно, что для летней модели ошибки практически не выходят за пределы 1 % для всего диапазона высот 0—3 км, а для зимней — до высоты 1,5 км.

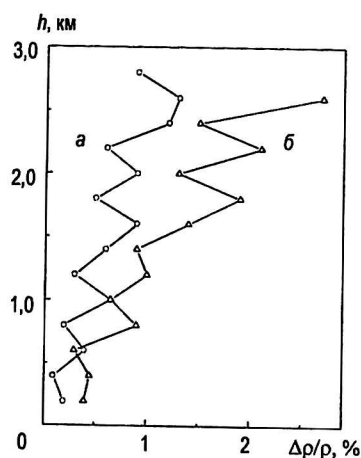


Рис. 3. Случайные ошибки восстановления профилей влажности для: а — лета; б — зимы

На рис. 4 показаны модельный и восстановленный по схеме (5)—(7) профили температуры для зимы (а) и лета (б) средних широт. Проведенное численное моделирование показало, что вертикальные профили температуры можно восстанавливать с ошибками менее 1 К до высоты 2 км. В зимнее время подобная точность при том же пространственном разрешении реализуется на меньших высотах.

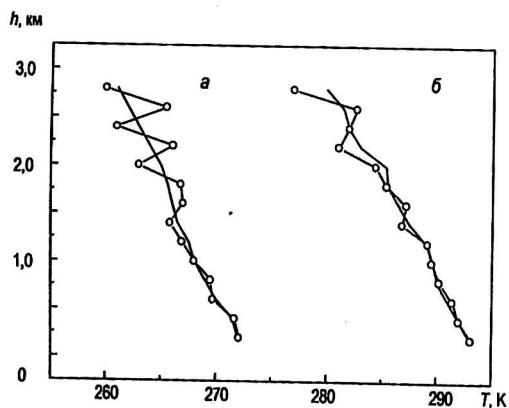


Рис. 4. Профили температуры средних широт для: а — зимы; б — лета; — — модельный профиль; —○— — восстановленный

### Заключение

Проведенные исследования генераторов комбинационных частот излучения  $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ -,  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ - и непрерывных  $\text{CO}_2$ -лазеров на основе нелинейных кристаллов  $\text{ZnGeP}_2$  и  $\text{CdSe}$  показали перспективность их применения для решения задач оптического мониторинга атмосферы в средней ИК-области спектра.

Результаты численного моделирования определения высотных профилей метеорологических параметров атмосферы с помощью лидарной системы дифференциального поглощения, функционирующей в безопасной для глаз области спектра, показали, что ошибки восстановления профилей температуры и влажности имеют приемлемые значения во всем диапазоне высот 0–2 км.

Работа выполнена при поддержке гранта  
РФФИ № 00-05-72014.

### Литература

- Lasers and Optical Radiation. Environmental Health Criteria. — Geneva, 1982. — 369 p.
- Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. — М.: Радио и связь, 1981. — 288 с.
- Infrared detectors. Hamamatsu catalog No. KIRD0001E04. Hamamatsu Photonics K. K. 1995. Sept., Solid State division.
- Lee S. W., Zenker T., Chyba T. H. An OPO based lidar system for different absorption measurements of methane in the 3- $\mu\text{m}$  region// NASA / SP-1998-207671 / PT2. 1998. P. 853–856.
- Chou S. I., Baer D. S., Hanson R. K. Diode laser absorption measurements of  $\text{CH}_3\text{Cl}$  and  $\text{CH}_4$  near 1,65  $\mu\text{m}$ // Applied Optics. 1997. V. 36. № 15. P. 3288–3293.
- Андреев Ю. М., Грибенюков А. И., Бетин А. А. и др. Преобразование излучения  $\text{CO}_2$ - и  $\text{CO}$ -лазеров в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$  в область спектра 2,3–3,1 мкм// Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 7. С. 1535–1537.
- Андреев Ю. М., Воеводин В. Г., Грибенюков А. И., Новиков В. П. Смешение частот  $\text{CO}_2$ - и  $\text{CO}$ -лазеров в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$ // Там же. 1987. Т. 14. № 6. С. 1177–1178.
- Ferrario A., Garbi M. Efficient up-conversion in  $\text{CdSe}$ // Optics Communications. 1976. V. 17. № 2. P. 158–159.
- Гурдазян Г. Г., Дмитриев В. Г., Никогосян Д. Н. Нелинейные оптические кристаллы: Справочник. — М.: Радио и связь, 1991. С. 160.
- Ohmer M. C., Pandey R. Emergence of Chalcopyrites as Nonlinear Optical Materials// MRS Bulletin. 1998. № 7. P. 16–22.
- Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. — М.: Радио и связь, 1982. — 504 с.
- Andreev Yu. M., Vernik A. V., Geiko P. P., Voevodina O. V.  $\text{ZnGeP}_2$  crystal is the leader among nonlinear crystals for middle IR// Proc. SPIE. 2000. V. 3983. P. 395–406.
- Mason J. Lidar measurement of temperature: A new approach// Appl. Opt., 1975. V. 14. № 14. P. 76–78.
- Зуев В. В., Матвиенко Г. Г., Романовский О. А., Харченко О. В. Численное моделирование лазерного зондирования температуры и влажности атмосферы методом дифференциального поглощения в ближней ИК-области спектра с использованием метеорологического лидара МЕЛ-01// Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 316–321.
- Husson N., Chedin A., Scotte N. E. et al. The GEISA Spectroscopic Lines Parameters Data Bank in 1984// Annales Geophysical. 1986. Fasc. 2, Series A. P. 185–190.
- Schotland R. M. Errors in the lidar measurements of atmospheric gases by differential absorption// J. Appl. Meteorology. 1974. V. 13. № 2. P. 71–77.
- Endeman M., Byer R. L. Simultaneous remote measurements of atmospheric temperature and humidity using a continuously tunable infrared lidar// Opt. Letters. 1980. V. 5. № 10. P. 452–454.
- McCatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A. et al. Optical properties of atmosphere: Report AFCRL-71-0297, Bedford, Mass., 1971. P. 86.
- Креков Г. М., Рахимов П. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — г. Новосибирск: Наука, 1982. — 199 с.
- Зуев В. В., Романовский О. А. К учету систематических погрешностей в лидарном методе дифференциального поглощения. Депон. в ВИНИТИ; рег. № 4675-B87 от 25.06.87 г.

## Generators of combination frequencies of the erbium and $\text{CO}_2$ -lasers in problems of lidar sondage of atmosphere meteoroparameters

Yu. M. Andreev, P. P. Geyiko  
Institute of Optical Monitoring, Tomsk, Russia

G. G. Matvienko, O. A. Romanovsky, O. V. Kharchenko  
Institute of Atmosphere Optics, Tomsk, Russia

*The conducted examinations of generators of combination frequencies of erbium and  $\text{CO}_2$ -lasers on the basis of nonlinear  $\text{ZnGeP}_2$  and  $\text{CdSe}$  crystals have shown prospects of their application for the optical monitoring of atmosphere in the middle IR range of spectrum. Computational modeling for the lidar sondage of high-altitude profiles of atmosphere meteoroparameters has shown that errors of restitution of the temperature and humidity profiles have reasonable values in all altitude range from 0 up to 2 km.*