

С.Н. Волков, М.М. Макогон, В.И. Сердюков

Дифракционный полихроматор для СКР-лидара

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 5.10.2004 г.

Предложена оригинальная оптическая схема полихроматора для СКР-лидара. Достоинством схемы являются простота изготовления и эффективность в использовании. Приведен метод расчета двухступенчатого дифракционного полихроматора. Описаны конструкция прибора, методика его настройки, и приведены результаты испытаний.

Введение

В лидарах спонтанного комбинационного рассеяния света — СКР-лидарах (в иностранной литературе — Raman lidar) сигналы обратного рассеяния создаются за счет возбуждения излучением лазера вращательных и колебательно-вращательных переходов исследуемых молекул и возникающего при этом переизлучения на смещенных длинах волн. Поскольку рассеяние света в процессе СКР является практически мгновенным [1], то пространственное разрешение получаемых данных равно «длине» возбуждающего лазерного импульса. Вследствие независимости эффекта проявления СКР от возбуждающей длины волны излучения и возможности идентификации молекул по их спектру, а также прямой пропорциональной зависимости интенсивности линий СКР от концентрации газа, этот метод перспективен для зондирования малых газовых составляющих (МГС), а также выбросов загрязняющих газов от промышленных и топливно-энергетических объектов и транспорта.

Основное преимущество лидарного метода СКР заключается в возможности обнаружения и измерения содержания многих газовых составляющих атмосферы с использованием одного лазера, работающего на фиксированной длине волны.

Первая демонстрация определения видов молекул в окружающей среде методом комбинационного рассеяния была проведена Леонардом в 1967 г. (регистрировались атмосферные азот и кислород [2]). С тех пор было разработано довольно много СКР-лидаров [3, 4]. Эти системы пригодны для измерения как малых атмосферных загрязнений, так и локальных выбросов в воздушные бассейны промышленных центров: в работе [5] описаны СКР-лидар для дистанционной инспекции потоков топочных газов на срезах труб ТЭЦ и результаты проведенных измерений. Дистанционные СКР-системы измеряли температуру атмосферы с помощью вращательной спектроскопии комбинационного рассеяния [6, 7].

Привлекательность метода состоит в том, что может быть определена абсолютная концентрация газа путем сравнения СКР-сигналов от исследуемой

компоненты с СКР-сигналами от молекул азота, которые являются внутренним стандартом при зондировании атмосферы, а также возможностью метрологической аттестации этого метода в отличие от других методов лазерного зондирования.

К настоящему времени СКР-лидарами в приземном слое воздуха измерены концентрации таких МГС, как CO, CO₂, SO₂, C₂H₄, H₂CO, NO, H₂S, C₃H₄, и соединений, таких как циклогексан, изопропил, ацетон и др. [1, 8, 9]. Имеются сообщения о применении NASA на борту летающей лаборатории DC-8 рамановского лидара для дистанционных измерений метана, водяного пара и температуры. Но современные СКР-лидары нашли широкое применение только для зондирования водяного пара и температуры в тропосфере [10–12].

Определенным недостатком метода СКР-зондирования являются малые сечения комбинационного рассеяния газовых составляющих атмосферы (на два-три порядка ниже рэлеевского и на много порядков ниже аэрозольного сечений рассеяния), поэтому получение в лидаре необходимого отношения сигнал-шум достигается за счет повышенных требований к энергетическим и спектральным характеристикам: большой энергии и пиковой мощности импульса излучения, а также повышенным требованиям к спектральной аппаратуре.

По-видимому, основная причина ограниченной реализации метода в измерениях газовых загрязнений кроется в его главном недостатке — слабых лидарных сигналах (из-за слабого взаимодействия и малой концентрации тестируемых газовых составляющих), которые трудно выделить на фоне сигналов упругого рассеяния, а также из-за вероятного наложения спектров СКР от разных молекул (смешение сигналов). Решение данных проблем требует кардинального улучшения спектральной селекции и чувствительности приемной аппаратуры. В настоящей работе описан новый разработанный нами вариант высокоселективного спектрального прибора для СКР-лидаров широкого применения.

Ниже перечислены требования, предъявляемые к полихроматорам СКР-лидаров:

1) необходимо выделять одновременно несколько (как правило, около 10) аналитических спектральных интервалов: 5–8 линий КР анализируемых газов, линии КР азота и кислорода;

2) спектральная ширина полосы пропускания в каждом канале должна составлять не более 6–8 см^{-1} (ширина Q -ветви колебательно-вращательной полосы);

3) полихроматор должен подавлять рассеянное излучение на несмещенной частоте не менее чем на 12–13 порядков величины;

4) пропускание спектрального прибора должно быть по возможности более высоким;

5) желательно связь полихроматора с приемным телескопом и фотоприемниками осуществлять с помощью световодов.

Первое требование фактически определяет структуру построения прибора — «развести» излучение по такому большому числу спектральных каналов можно только с помощью спектрального устройства с большой угловой дисперсией. В видимом участке спектра дифракционная решетка работает намного эффективнее, чем призма, поэтому целесообразно выполнить спектральный селектор на базе дифракционного спектрометра. Нужное подавление рассеянного излучения на несмещенной частоте может быть достигнуто путем использования второй ступени дифракционного полихроматора или дополнительных фильтров.

Проект полихроматора

На протяжении многих десятилетий выбор оптических элементов, находящихся в распоряжении разработчиков спектральных приборов, остается постоянным — зеркало, линза, призма и дифракционная решетка. Внедрение в практику производства оптических элементов новых технологий позволяет постепенно расширять их качественный диапазон: создавать новые оптические материалы со сверхвысоким показателем преломления, голографические дифракционные решетки и голографические фильтры, применять для связи оптических элементов световоды.

Как всегда, определяющим моментом в использовании новейших технологических разработок в оптических устройствах является оптимальное соотношение цены и качества. Поэтому особенно ценны конструктивные решения, позволяющие простым образом разрешать возникающие проблемы. Например, применение световодов в качестве оптической развязки между оптическими узлами в лидарах позволило обеспечить механическую стабильность параметров и вынести оптические узлы, критичные к атмосферному и электрическому воздействию, в более благоприятные условия.

Более сложной оказывается проблема снижения потерь в спектральных устройствах СКР-лидаров. Широко применяется схема монохроматора Эберта–Фасти благодаря идее снижения aberrаций в плоскости дисперсии, что позволяет достаточно просто добиться необходимого спектрального разрешения при небольших оптических искажениях. Однако

в перпендикулярной плоскости aberrации сильно возрастают, что приводит к потере энергии, поэтому применение такой оптической схемы предполагает наличие мощных источников излучения и больших интервалов времени для фиксации спектра. Следовательно, использование указанной оптической схемы в СКР-лидарах, критичных к потерям излучения, становится проблематичным.

Традиционно применяемые технологические решения, в частности переход в автоколлимационный режим, только частично снимают проблему больших потерь излучения. В связи с этим можно отметить использование зеркальной схемы монохроматора Пфунда [14] и линзовых оптических объективов. Характерной особенностью подобных решений является применение сложных в изготовлении параболических зеркал или многокомпонентных оптических объективов, что значительно удорожает стоимость СКР-лидара и приводит к ограничению области применения — в основном в крупных научно-исследовательских центрах.

Нами предложена оригинальная оптическая схема полихроматора, построенного на основе модифицированной схемы Эберта–Фасти, работающая в автоколлимационном режиме и лишенная подобных недостатков (рис. 1). Определяющим моментом явилось использование голографической решетки, световодов в качестве входных и выходных щелей полихроматора, а также такое размещение оптических элементов, которое позволило при апертуре полихроматора 1:5 использовать стандартное сферическое зеркало.

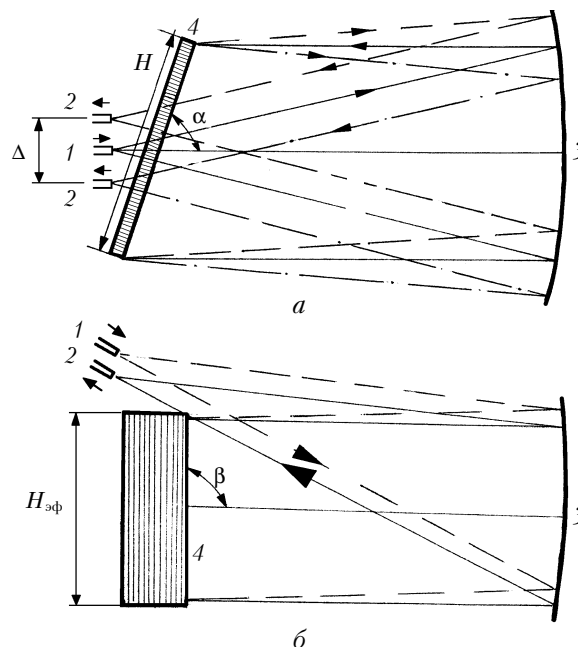


Рис. 1. Схема селектора КР-лидара (*а* — вид в плоскости дисперсии, *б* — в перпендикулярной плоскости): 1 — входной световод; 2 — выходные световоды; 3 — зеркало; 4 — дифракционная решетка

Прибор рассчитан на работу в сравнительно узком спектральном интервале и не предполагает

перестройки в процессе работы. Выбором угла α решетка устанавливается так, что она работает в автоколлимационном режиме для средней длины волны $\lambda_{\text{ср}}$. Угол β подбирается таким, чтобы плоскость, в которой расположены выходные световоды, отстояла от входного световода на расстоянии не больше, чем необходимо для их крепления, — 1–2 мм; световоды располагаются также как можно ближе к решетке.

Параметры полихроматора связаны следующими соотношениями:

$$\lambda_{\text{ср}} = (\lambda_{\text{min}} + \lambda_{\text{max}})/2; \quad (1)$$

$$\varphi = \arcsin(K\lambda_{\text{ср}}/2t); \quad (2)$$

$$H_{\text{эф}} = H \cos \varphi; \quad (3)$$

$$\Delta l = (\lambda_{i+1} - \lambda_i)D_l; \quad (4)$$

$$\Delta = (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})D_l; \quad (5)$$

$$\Delta v_c = d_{\text{св}}/(\lambda^2 D_l); \quad (6)$$

$$D_l = 2F\varphi/\lambda; \quad (7)$$

$$F = H_{\text{эф}}/0,25, \quad (8)$$

где φ — угол падения излучения на решетку; K — порядок дифракции; t — постоянная решетки; $H_{\text{эф}}$ — размер проекции решетки на направление падающего излучения; Δl — расстояние между световодами, в которые выводится излучение «соседних» по длинам волн полос комбинационного рассеяния определяемых газов; Δ — максимальное расстояние между световодами; D_l — линейная дисперсия полихроматора; Δv_c — полоса пропускания полихроматора; $d_{\text{св}}$ — диаметр световода; F — фокусное расстояние коллиматора полихроматора.

Поскольку угловая апертура световода равна $1/4$, фокусное расстояние коллиматора и размер решетки оказываются связанными последним соотношением.

В табл. 1 приведены результаты расчета спектрального селектора на основе решетки, имеющей 600 штр./мм и работающей в 3, 4 и 5-м порядках, диаметр световодов полагался равным 1 мм, для определенности рассмотрены основные загрязняющие атмосферу газы. Из данных табл. 1 следует, что нужную полосу пропускания можно обеспечить с любой из рассмотренных решеток, но при снижении порядка дифракции необходимо увеличивать ее размер. Вместе с тем при увеличении порядка дифракции растет отношение Δ/F , что будет приводить к большей абберации пучков и снижению сбора дифрагированного излучения выходными световодами. В качестве спектрального устройства можно использовать решетку, имеющую ширину 150 мм, 600 штр./мм и работающую в 4-м порядке. Те же самые характеристики будут достигнуты для решеток с 1200 и 2400 штр./мм, работающих во 2-м и 1-м порядках дифракции соответственно; выбор между ними должен осуществляться на основе анализа эффективности дифракции излучения в рабочий порядок, качества и цены.

Второй полихроматор может быть выполнен по той же схеме (рис. 2), причем для каждой длины волны он обеспечит автоколлимационный режим. Расстояние между «крайними» световодами Δ_1 меньше, чем Δ в первом каскаде, и для решетки размером 150 мм с 600 штр./мм, работающей в 4-м порядке, составляет 43,08 мм. Вторым полихроматором имеет такую же селективность, как и первый; дополнительное достоинство применения двойного полихроматора состоит в улучшении подавления не только излучения на лазерной длине волны, но и излучения соседних полос комбинационного рассеяния, что, например, особенно важно при регистрации малых количеств NO_2 на фоне большой концентрации CO_2 .

Таблица 1

Основные расчетные параметры полихроматоров

K	3			4						5		
	φ , град	H, мм	$H_{\text{эф}}$, мм	Δl , мм	$\Delta l/d_{\text{св}}$	Δv_c	Δl , мм	$\Delta l/d_{\text{св}}$	Δv_c	Δl , мм	$\Delta l/d_{\text{св}}$	Δv_c
	32,43	200	168,81	7,893	26,312	6,169	45,64	150	120	63,35	120	53,82
	675,24	360000	419,47	360000	419,47	288000	335,57	215,30	215,30	360000	360000	360000
Газы	Δl , мм	$\Delta l/d_{\text{св}}$	Δv_c	Δl , мм	$\Delta l/d_{\text{св}}$	Δv_c	Δl , мм	$\Delta l/d_{\text{св}}$	Δv_c	Δl , мм	$\Delta l/d_{\text{св}}$	Δv_c
SO_2	7,893	26,312	6,169	7,893	26,312	6,169	6,315	21,049	7,711	7,893	26,312	6,169
NO_2	3,219	10,731	6,110	3,219	10,731	6,110	2,575	8,585	7,637	3,219	10,731	6,110
CO_2	8,062	26,875	6,086	8,062	26,875	6,086	6,450	21,500	7,608	8,062	26,875	6,086
O_2	15,850	52,835	6,027	15,850	52,835	6,027	12,680	42,268	7,534	15,850	52,835	6,027
NO	13,701	45,672	5,915	13,701	45,672	5,915	10,961	36,537	7,394	13,701	45,672	5,915
CO	9,771	32,572	5,821	9,771	32,572	5,821	7,817	26,057	7,277	9,771	32,572	5,821
N_2	27,396	91,321	5,756	27,396	91,321	5,756	21,917	73,057	7,195	27,396	91,321	5,756
Δ , мм	85,895			85,895			68,716			85,895		
Δ/F	0,12720			0,20477			0,20477			0,39895		

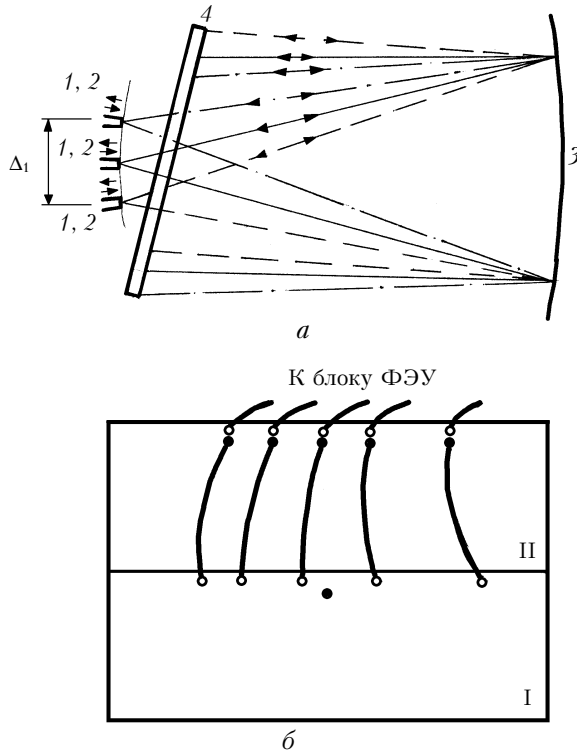


Рис. 2. Схема второго полихроматора (а) и вид на двойное спектрально-селективное устройство со стороны световодов (б): I и II – первая и вторая ступени полихроматора. Темные кружки – входные световоды, светлые – выходные. 1 – входные световоды; 2 – выходные; 3 – зеркало; 4 – дифракционная решетка

Расчет аберраций

Обычно проводимый аберрационный анализ полихроматора, выполненного по схеме Эберта–Фасти, в большей степени пригоден для визуального контроля качества изображения. Для контроля энергетических параметров размытия изображения более удобен подход, основанный на анализе изображения объекта точечного размера или конечной величины. При таком рассмотрении в объектной плоскости располагается источник излучения с пространственными и угловыми характеристиками, имитирующими, например, входной световод. Алгоритм вычислений построен следующим образом: объект разбивается на ряд точечных источников, излучение которых распространяется через оптическую систему, обладающую аберрациями, и в плоскости изображения с учетом энергетического веса каждого точечного источника формируется изображение источника в целом. Таким образом, имеется возможность, основываясь на фотометрическом анализе изображения, определить подходящие размеры выходного световода, согласованного с входным. Кроме того, учитывая неоднородность размытия изображения, можно определить скорректированные координаты световодов, обеспечивающие максимальную передачу энергии. Подобный фотометрический анализ наиболее пригоден для оценок характеристик полихроматоров, построенных с использованием световодной техники.

Распространение излучения от точечного источника может быть рассчитано в различных приближениях, в частности в лучевом (под лучами в данном случае подразумеваются нормали к волновым фронтам). Лучевое приближение основывается на решении уравнения Гельмгольца

$$\nabla^2 u(x, y, z) + k^2 u(x, y, z) = 0, \quad (9)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор. Таким образом, осуществляется переход к распространению лучей, соответствующему принципу Ферма.

Решение волнового уравнения может быть получено в виде сферической или плоской волн, а для гауссовых пучков, распространяющихся в направлении z , что соответствует излучению, выходящему из световода, его можно представить в виде

$$u(x, y, z) = \psi\{x, y, z\} \exp(\pm ikz), \quad (10)$$

где $\psi\{x, y, z\}$ – амплитудно-фазовая функция, являющаяся решением волнового уравнения

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{d^2\Psi}{dy^2} + \frac{d^2\Psi}{dz^2} - 2ik \frac{d\Psi}{dz} = 0. \quad (11)$$

Поскольку пучок распространяется вдоль оси z , то $\psi\{x, y, z\}$ должно удовлетворять так называемому паракиальному (или параболическому) волновому уравнению

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{d^2\Psi}{dy^2} - 2ik \frac{d\Psi}{dz} = 0. \quad (12)$$

Его решение, найденное через ортогональные функции, выглядит как

$$u(x, y, z) = \frac{w_0}{w(z)} H_m\left(\frac{\sqrt{2}}{w} x\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}}{w} y\right) \times \exp\left[-i(kz - \Phi(z)) - r^2\left(\frac{1}{w^2(z)} + \frac{ik}{2R(z)}\right)\right], \quad (13)$$

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad \Phi(z) = \arctg\left[\lambda z / (\pi w_0^2)\right]. \quad (14)$$

Функции H_m и H_n – полиномы Эрмита:

$$H_0(\xi) = 1,$$

$$H_1(\xi) = 2\xi,$$

$$H_n(\xi) = (-1)^n e^{\xi^2} \frac{d^n}{d\xi^n} e^{-\xi^2}, \quad (15)$$

а $w(z)$ и $R(z)$ – ширина и радиус кривизны гауссова пучка; w_0 – константа.

Представляя источник излучения множеством лучей с плотностью вероятности $p(x)$ и $p(y)$, перейдем к статистическому описанию размытия изображения. Второй центральный момент, определяющий размер изображения, равен

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \langle x \rangle)^2 p(x) dx. \quad (16)$$

Для n лучей с весом w_i , прошедших через оптическую систему, в координатах смещений $\{\Delta X$ и $\Delta Y\}$ в плоскости изображения относительно оси центрального (вершинного) луча вторые центральные моменты равны

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n w_i (\Delta X_i - \langle x \rangle)^2,$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n w_i (\Delta Y_i - \langle y \rangle)^2,$$
(17)

где

$$W = \sum_{i=1}^n w_i. \quad (18)$$

Извлекая корни из вторых центральных моментов, получим среднеквадратические величины размытия изображения (root-mean-square (RMS)).

Для проведения расчетов и наглядного представления результатов был разработан пакет прикладных программ. Расчеты выполнены применительно к полихроматору, предназначенному для установки в СКР-лидар, источником излучения в котором служит лазер на парах меди (длина волны 0,51055 мкм). Результаты расчетов aberrаций приведены на рис. 3. Как видно, пятно излучения в плоскости выходного торца световода не является круглым, поэтому доля прошедшего в световод излучения (коэффициент сбора) зависит от диаметра выходного световода (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты сбора излучения $K_{сб}$ СКР азота (диаметр входного световода 0,8 мм, $\lambda = 0,57952$ мкм)

Смещение в плоскости изображения, мм	Диаметр выходного световода, мм	$K_{сб}$, %
0	1,0	92,7
0	1,2	98,0
4,5543	1,0	77,5
4,5543	1,2	88,3

Кроме того, для более эффективного сбора световод необходимо немного сместить относительно положения, рассчитанного без учета aberrаций (табл. 3).

Таблица 3

Расчетные величины координат для вывода комбинационного рассеяния, мм

Газ	$\Delta\nu$, см ⁻¹	λ , мкм	X	X _{кор}	Y	Y _{кор}	
SO ₂	1151	0,54243	-6,9779	-7,0179	35,2892	35,3274	
NO ₂	1320	0,54744	-6,2859	-6,3259	25,9869	26,015	
CO ₂	1388	0,54949	-5,9978	-6,0378	22,1452	22,1691	
O ₂	1556	0,55461	-5,2654	-5,3054	12,457	12,4705	
NO	1877	0,56466	-3,771	-3,811	-6,97307	-6,9806	
CO	2145	0,57334	-2,4146	-2,4546	-24,2366	-24,2628	
N ₂	2331	0,57952	-1,4082	-2,4482	-36,8285	-36,8683	
Hg	1	-	0,546074	-6,4762	-6,5162	28,5352	28,566
	2	-	0,567586	-3,3209	-3,3609	-12,7401	-12,7539
	3	-	0,57696	-1,8293	-1,8693	-31,5806	-31,6147
	4	-	0,579016	-1,4916	-1,5316	-35,7917	-35,8304
	5	-	0,580365	-1,2678	-1,3078	-38,571	-38,6127

Из полученных данных следует, что надлежащим выбором световодов можно обеспечить не менее чем 90%-ю фотометрическую эффективность полихроматора.

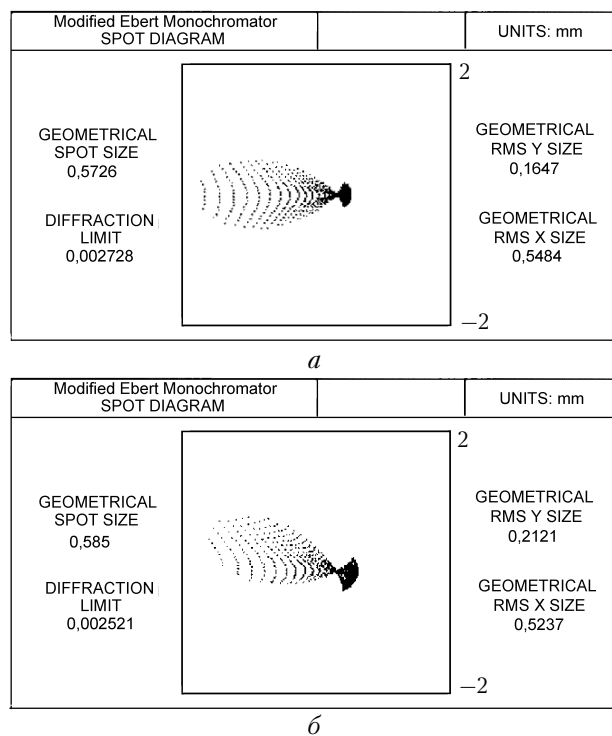


Рис. 3. Вид пятна точечного источника в центре (а) и на краю (б) поля изображения

Конструкция полихроматора

Для ввода излучения в полихроматор и вывода дифрагированного излучения в разработанной нами конструкции используются световоды. Концы световодов заключены в металлические обоймы, которые закрепляются в фигурной пластине (маске), расположенной таким образом, что торцы световодов находятся в плоскости изображения. Положение отверстий для крепления световодов определяется длинами волн, на которые должен быть настроен полихроматор. В нашем случае он рассчитан на регистрацию атмосферных азота и кислорода, а также оксидов азота и углерода и двуокисей азота, углерода и серы. В пластине также есть 5 отверстий для крепления световодов, по которым выводятся 5 линий излучения ртутной лампы, используемой для настройки полихроматора. Смещение L изображения входного световода относительно оси, соответствующей его изображению в угле блеска, определяется по формуле

$$L = F \operatorname{tg} [\phi(\phi, k, \Delta\nu) - \phi(\phi, k, 0)], \quad (19)$$

где

$$\phi(\phi, k, \Delta\nu) = \arcsin \left(\frac{k}{t(\nu_0 - \Delta\nu)} - \sin \phi \right), \quad (20)$$

ϕ — угол дифракции; $\Delta\nu$ — стоксовый сдвиг частоты; ν_0 — частота возбуждающего лазерного излучения.

Результаты расчета величин смещений по формуле (19) приведены в табл. 3 (колонки X и Y ; координата X – положение выходных световодов относительно входного в плоскости, перпендикулярной дисперсии, координата Y – в плоскости дисперсии). В колонках $X_{кор}$ и $Y_{кор}$ приведены значения смещений, скорректированных с учетом абберационного искажения изображения.

Полихроматор как часть аппаратуры лидара может находиться в достаточно жестких условиях эксплуатации. Прежде всего, это вибрации и значительный перепад температур (вплоть до 60°C). Поэтому необходимо, чтобы конструкция полихроматора была в достаточной степени жесткой при сохранении простоты и доступности юстировки, что является основой функционирования лидарной системы в целом.

Нами был проведен расчет нагрузок, возникающих в полихроматоре, обусловленных прежде всего массой зеркала и дифракционной решетки в оправе. Рассчитывались как деформации несущих элементов, так и температурные искажения. В результате анализа нами была принята конструкция полихроматора, в котором все компоненты закреплены на жестком каркасе, образованном четырьмя инваровыми стержнями и двумя металлическими пластинами. На одной пластине с помощью юстировочных узлов закреплено зеркало в оправе, на другой – дифракционная решетка в оправе и юстировочный столик, на котором располагается световодный узел (маска со световодами).

Каркас полихроматора помещен в светозащитный кожух, обеспечивающий также светонепроницаемость узла ввода световодов. В кожухе имеется светонепроницаемая крышка, обеспечивающая достаточно удобный подход к юстировочному столику со световодами. Общий вид полихроматора показан на рис. 4.

Настройка и испытание полихроматора проводились по пробному излучению газоразрядных линий Hg. По той же методике, по которой рассчитывалось положение линий комбинационного рассеяния газов, был проведен расчет положения линий в диапазоне $0,54\text{--}0,58\text{ мкм}$ (см. табл. 3). В соответствии с этими расчетами в приемной маске изготавливались отверстия для световодов в два ряда. В первом ряду располагались световоды, принимающие излучение линий комбинационного рассеяния и одной линии Hg ($\lambda = 0,579016\text{ мкм}$), во втором ряду находились входной световод полихроматора и световоды, принимающие излучение остальных линий Hg.

Настройка приемной маски по пробному излучению (второй ряд) автоматически приводила к полной настройке первого ряда после вертикального смещения маски и ее юстировки только по одной линии ртути $\lambda = 0,579016\text{ мкм}$.

Эксперимент показал, что смещение маски вновь на второй ряд приводило к изменению сигнала от линий ртути не более чем $1\text{--}5\%$, что соответствует «разъюстировке» маски не более $0,02\text{ мм}$.

В разработанном полихроматоре мы использовали голограммную дифракционную решетку, имеющую 2400 штр./мм и работающую в первом порядке (изготовлена в НПО ГИПО). В такой решетке рассеяние как минимум на два порядка ниже, чем у нарезных решеток (реплик). Отметим, что вопрос об использовании второго полихроматора в лидаре для подавления рассеянного аэрозолем зондирующего излучения должен решаться применительно к конкретным условиям измерений. Наряду с применением второго полихроматора, подавление рассеянного на лазерной длине волны излучения может быть достигнуто при использовании:



Рис. 4. Внешний вид полихроматора

1) спектрально-селективных интерференционных покрытий на зеркалах системы сканирования и телескопа;

2) заграждающего полосового фильтра (Notch-фильтра) перед вводом излучения в спектральный селектор (например, фильтры фирмы Kaiser Optical Systems, Inc. [13] на заграждаемой длине волны имеют оптическую плотность более 6 при пропускании в рабочей области не менее 75%);

3) подходящих полосовых фильтров (цветных стекол);

4) дополнительных узкополосных интерференционных фильтров, рассчитанных на конкретные длины волн комбинационного рассеяния и установленных перед соответствующими фотоприемниками.

1. Хинкли Э.Д. Лазерный контроль атмосферы. М.: Мир, 1979. 416 с.
2. Костко О.К., Портасов В.С., Хаттамов В.У., Чаянова Э.А. Применение лазеров для определения состава атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 216 с.
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
4. Лазерное зондирование атмосферы из космоса / Под ред. В.М. Захарова. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 216 с.

5. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Шумский В.К., Попов А.Г., Сериков И.Б. Дистанционное определение состава, скорости истечения и температуры выбросов из труб предприятия КР-лидаром // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5. № 7. С. 726–733.

6. Cohen A., Cooney J., Geller K. Atmospheric temperature profiles from lidar measurements of rotational Raman and elastic scattering // Appl. Opt. 1976. V. 15. N 11. P. 2896–2901.

7. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Зуев В.Е., Литов В.М. Измерение температуры атмосферы лидаром по вращательным спектрам КР N₂ и O₂ // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 94–107.

8. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеониздат, 1990. 320 с.

9. Ray M.D., Sedlacek Ar.J. Mini Raman-Radar System for InSitu, Stand-off Interrogation of Surface Contamination // 19th ILRC. USA. NASA. 1998. P. 677–679.

10. Third international lidar reseachears directory / Compiled by McCormick M.P. USA: NASA. 1993. 180 p.

11. Abstracts of the 19th International Laser Radar Conference. USA. NASA. 1998. 986 p.

12. Advances in Laser Remote Sensing: Selected Peper of the 20th ILRC. Vichy, France. 2000. 492 p.

13. www.kosi.com.

14. Тарасов К.И. Спектральные приборы. Л.: Машиностроение, 1977. 360 с.

S.N. Volkov, M.M. Makogon, V.I. Serdyukov. **Diffractional polychromator for Raman lidar.**

The original optical layout of a polychromator for Raman lidar is offered. The ease of fabrication and the efficiency in use are the advantage of this layout. The method for calculation of a two-step diffractional polychromator is presented. The polychromator design, principles of adjustment, and test results are described.