

А.А. Зарудный, Ю.Е. Мегель, М.Ф. Лагутин

ЛИДАР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЗОСФЕРНОЙ ПРИМЕСИ

Описана лазерно-локационная система, предназначенная для локации атмосферного натрия с использованием эффекта резонансной флуоресценции. Проведен анализ параметров лидара, в котором в качестве передатчика применен ОКГ на основе органического красителя с ламповой накачкой. Особое внимание уделено полосе излучения лазера, предназначенного для локации малых атмосферных компонент. Приведены расчетные характеристики полосы излучения ОКГ с учетом доплеровского уширения линии атмосферного натрия для температур в мезосфере. Показано, что при ширине линии излучения, превышающей контур поглощения натриевой линии, неопределенность $\sigma_{эфф}$ для данных температур не превышает 2%. Сделаны выводы о точности определения концентрации лоцируемой примеси в зависимости от полосы и стабильности характеристик излучения лазера.

Исследование малых компонентов верхней атмосферы методом резонансной флуоресценции представляет одну из перспективных проблем лазерного зондирования. Среди этих исследований в первую очередь необходимо отметить наблюдения атмосферного натрия, регулярно проводимые рядом авторов [1–3] и открывающие перспективы определения температуры, скорости и направления ветра с земной поверхности на высотах порядка 80–100 км.

В состав описываемого лидара, разработанного для исследования атмосферного натрия, входят лазер на красителе с ламповой накачкой, обеспечивающий энергию 0,3 Дж в полосе 8 нм, и приемный телескоп на базе зеркала диаметром 0,8 м. Структурная схема лидара изображена на рис. 1, а основные характеристики представлены ниже.

Передатчик		Приемник	
Энергия, Дж	— 0,3	Диаметр зеркала, м	— 0,8
Длительность импульса, мкс	— 3,5	Полуширина полосы пропускания светофильтра, нм	— 2,0
Частота повторения, Гц	— 0,2	Угол зрения приемного телескопа, рад	— $1 \cdot 10^{-3}$
Длина волны, нм	— 589	Высотный интервал, км	— 1,0
Расходимость излучения, рад	— $5 \cdot 10^{-4}$	Количество каналов	— 100
Коэффициент пропускания оптики	— 0,6	Коэффициент пропускания приемной оптики	— 0,2

Приемный телескоп собран по схеме Ньютона на базе сферического зеркала диаметром 0,8 м и фокусным расстоянием 2,6 м. Угол зрения телескопа, связанный с расходимостью излучения лазера, задается диафрагмой, установленной в плоскости зеркала. Диаметр пятна рассеяния составляет 0,6 мм, что позволит при необходимости уменьшить угол зрения приемного телескопа до 0,5 мрад. Для согласования углов падения световых пучков со спектральными характеристиками интерференционного фильтра применялись дополнительные коллимирующая линза и конденсор.

В качестве фотоприемника применялись отобранные образцы ФЭУ–77, характеризующиеся хорошей чувствительностью в видимой области спектра, малым уровнем темновых шумов и хорошими одноэлектронными характеристиками, позволяющими осуществить эффективную амплитудную дискриминацию диодных шумов. Квантовая эффективность ФЭУ на длине волны 589 нм составляет не менее 2%.

Поскольку при лазерной локации верхней атмосферы интенсивность рассеянного излучения, принимаемого приемником, имеет большой динамический диапазон, особое внимание уделялось предотвращению перегрузок ФЭУ, которые приводят к снижению его чувствительности и возрастанию темпового тока [4]. С этой целью применялся механический затвор — obtюратор, установленный непосредственно перед фотокатодом. Калибровка результатов исследований по молекулярному рассеянию вызывает необходимость установки момента полного раскрытия диафрагмы поля зрения, соответствующего высотам порядка 20 км. Экспериментальные исследования показали, что интенсивность сигнала обратного рассеяния в этом случае не перегружает ФЭУ и не вызывает люминесценции фо-

токаода. Для ночных наблюдений чувствительность приемной системы в основном определялась уровнем тем новых шумов ФЭУ, которые для отобранных образцов составляли 150–200 Гц.

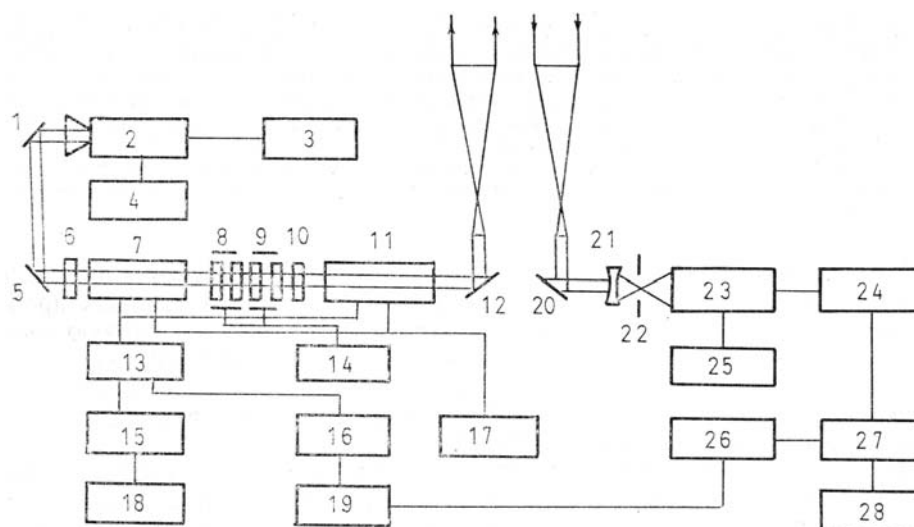


Рис. 1. Структурная схема лидара: 1, 5 – поворотное зеркало; 2 – резонансная камера с парами натрия; 3 – индикатор настройки частоты генерации; 4 – блок термостатирования резонансной камеры; 6, 10 – зеркала резонатора лазера; 7 – генератор лазера; 8, 9 – интерферометры Фабри–Перо; 11 – усилитель ОКГ; 12 – передающий телескоп; 13 – коммутатор энергии накопителя; 14 – блок термостатирования интерферометров; 15 – накопитель энергии; 16 – блок управления коммутатора; 17 – система прокачки активного вещества; 18 – высоковольтный выпрямитель; 19 – система синхронизации лидара; 20 – приемный телескоп; 21 – интерференционный светофильтр; 22 – диафрагма; 23 – ФЭУ; 24 – усилитель импульсов; 25 – блок питания ФЭУ; 26 – блок управления; 27 – приемно-регистрирующее устройство; 28 – дисплей

Регистрируемый сигнал после усилителя и дискриминатора поступает на многоканальный приемник, где стробируется в соответствии с высотными интервалами в 1 км. Полученная информация отображается на дисплее с последующей записью на магнитофон. Для оперативной оценки работы лазера на экране дисплея изображается поочередно информации об однократном зондировании и суммарный профиль. Длительность импульсов ФЭУ и быстродействие счетчиков определяют минимальную высоту регистрации отраженного сигнала, при которой возможно определение величины сигнала с наименьшими ошибками за счет аппаратной погрешности. Для данного типа ФЭУ и применяемых микросхем минимально разрешимый интервал составляет 30 нс. Если воспользоваться уравнением лазерной локации [6], то, учитывая чисто молекулярное рассеяние, количество надежно зарегистрированных фотоэлектронов будет соответствовать высоте 16 км. Определение величины отраженного сигнала с высот ниже указанной приводит к значительным ошибкам за счет аппаратной погрешности.

Передатчик лидара состоит из задающего генератора и однопроходного усилителя. Конструкции генератора и усилителя идентичны и собраны на базе двойных эллиптических рефлекторов. Кювета с красителем и 2 лампы типа ИСП–5000 помещаются в фокусах цилиндрического осветителя двухэллиптической конфигурации, изготовленного из алюминиевого сплава с последующим напылением алюминия в вакууме. Через кювету (внутренний диаметр 10 мм, длина 120 мм) с помощью центробежного насоса прокачивается этанольный раствор красителя со скоростью 5 л/мин. Фильтрация раствора осуществляется фильтром типа ФСН–5 из нержавеющей стали. Лампы помещаются в концентрические стеклянные рубашки и охлаждаются дистиллированной водой. Конструкция лазера обеспечивает быструю смену ламп без разъюстировки резонатора. Стеклянный резервуар емкостью 6 л, содержащий раствор родамина 6Ж с концентрацией 10^{-4} моль/л, обеспечивает работу лазера в течение 3000 вспышек при снижении энергии излучения на 20% по сравнению с исходной.

Электрические схемы разрядных контуров генератора и усилителя аналогичны. Каждая состоит из двух последовательно соединенных ламп и конденсатора емкостью 3 мкФ, коммутируемых общим разрядником типа РУ–66. Для увеличения срока службы ламп и улучшения воспроизводимости характеристик излучения использовалась схема со вспомогательным разрядом, исследованная ранее [5]. При напряжении источника питания 11 кВ, что соответствует энергии, подводимой к каждой лампе и равной 90 Дж, долговечность работы ламп составляет около 10^4 вспышек при частоте повторения 0,2 Гц.

Резонатор задающего генератора длиной 55 см образован двумя плоскими зеркалами с коэффициентами отражения 50 и 99% на длине волны 589 нм. Спектральное сужение и перестройка длины волны излучения лазера осуществляются двумя наклонными внутрирезонаторными интерферометрами Фабри–Перо с воздушными зазорами 12 и 300 мк, пластины которых диаметром 30 мм имеют диэлектрические покрытия с коэффициентами отражения соответственно 70 и 50%.

Расходимость излучения лазера — 2,5 мрад, ширина спектральной линии — 8 пм. Генератор работает в условиях более чем двукратного превышения накачки по сравнению с пороговой, что обеспечивает достаточную стабильность и воспроизводимость параметров излучения. Энергия излучения в режиме свободной генерации равнялась 1 Дж и снижалась до 0,15 Дж в резонаторе с интерферометрами. Столь значительное снижение энергии объясняется сравнительно большой первоначальной расходимостью излучения лазера, наличием непросветленных поверхностей внутрирезонаторных интерферометров, а также недостаточно высоким качеством изготовления пластин. Однопроходовой усилитель обеспечивает энергетический коэффициент усиления порядка 2,5 без заметного ухудшения спектральных и пространственных характеристик излучения. Двухкомпонентный зеркально-линзовый коллиматор (на базе объектива МТО—1000) с коэффициентом пропускания 0,7 используется для уменьшения расходимости излучения до 0,5 мрад.

Ширина линии генерации является очень важным параметром излучения, определяющим значение эффективного поперечника резонансного рассеяния и точность измерения концентрации примеси. Как известно, эффективное значение сечения резонансного рассеяния определяется выражением

$$\sigma_{\text{эфф}} = \frac{\int_0^{\infty} K(\lambda) N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} N(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $K(\lambda)$ — коэффициент поглощения на длине волны λ на атом (сечение поглощения); $N(\lambda)$ — спектральная плотность излучения фотонов на длине волны λ .

Исследования спектра генерации показали, что профиль спектральной линии излучения близок к гауссовому и может быть представлен в виде

$$N(\lambda) = \frac{2N_0 \sqrt{\ln 2}}{\Delta\lambda_L \sqrt{\pi}} e^{-\left[2\sqrt{\ln 2} \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_L}\right]^2}, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda_L$ — ширина спектра излучения лазера; N_0 — общее число излученных фотонов.

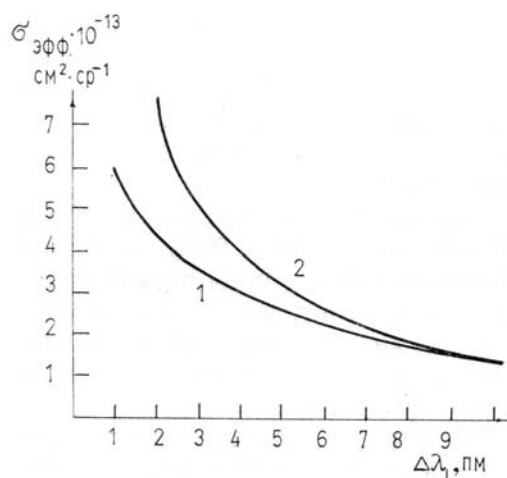


Рис. 2. Зависимость $\sigma_{\text{эфф}}$ от спектральной ширины излучения: 1 — зависимость $\sigma_{\text{эфф}}$ от $\Delta\lambda_L$, рассчитанная по формуле (1), ($T = 200$ К); 2 — зависимость $\sigma_{\text{эфф}}$ от $\Delta\lambda_L$, рассчитанная по формуле (4)

Для точного определения $\sigma_{\text{эфф}}$ необходимо учитывать сверхтонкую структуру D_2 линии натрия, которая образована двумя температурно—уширенными контурами, разделенными интервалом 1,97 пм с соотношением максимумов 5/3 пропорционально статистическому весу [7]. Доплеровское уширение для температуры 200 К, соответствующей высотам порядка 100 км, равняется 1,24 пм, следовательно, контуры резонансного поглощения частично перекрываются, образуя суммарный профиль с полушириной порядка 3 пм. На рис. 2 представлена зависимость максимального значения эффективного сечения обратного резонансного рассеяния от ширины спектра излучения, рассчитанная с использованием выражения (1), с учетом сверхтонкой структуры линии поглощения натрия при температуре 200 К. Расчеты $\sigma_{\text{эфф}}$ упрощаются для значений ширины спектра генерации, превышающих 5 пм. В этом случае линия поглощения может быть аппроксимирована одиночным доплеровским профилем с поглощением в центре линии, равным максимальному значению для D_{2a} линии. Очевидно, для того

чтобы суммарный коэффициент поглощения оставался неизменным, в соответствии с методикой, изложенной в [7], эффективная температура и ширина линии должны определяться соответственно выражениями

$$T_э = 2,56T, \quad \Delta\lambda_э = 1,6\Delta\lambda_д, \quad (3)$$

где T — кинетическая температура; $\Delta\lambda_д$ — доплеровская ширина линии, соответствующая кинетической температуре T .

Значение поперечника резонансного рассеяния может быть определено из простого соотношения

$$\sigma_{эфф} \approx \sigma_{э \max} \frac{\Delta\lambda_э}{\Delta\lambda_L}, \quad (4)$$

где $\sigma_{э \max}$ — максимальное значение поперечника резонансного рассеяния в максимуме эквивалентной линии.

Погрешность такой аппроксимации не превышает 10% для ширины спектра излучения 5 нм и уменьшается до 4% при ширине линии 8 нм. Результаты расчетов, сделанные с использованием соотношения (4), также изображены на рис. 2. Из рисунка видно, что для уменьшения погрешности при определении $\sigma_{эфф}$ в диапазоне $\Delta\lambda_L$ от 1 нм до 5 нм необходимо учитывать сверхтонкую структуру линии.

Точность определения концентрации примеси по результатам лидарных измерений в значительной степени зависит от априорной оценки $\sigma_{эфф}$. Абсолютные значения максимумов и доплеровское уширение контура резонансного поглощения определяются температурой, которая может заметно изменяться в высотном интервале, соответствующем локализации атомов натрия. Для определения величины $\sigma_{эфф}$ необходимо знать точные значения температуры на соответствующих высотах. Положение упрощается, если ширина линии генерации существенно превышает контур поглощения натриевой линии. В этом случае $\sigma_{эфф}$, определяемое выражением (4), практически не зависит от температуры, поскольку величины $\sigma_{э \max}$ и $\Delta\lambda_э$ имеют обратную температурную зависимость. Согласно расчетам для ширины спектра излучения 5 нм неопределенность $\sigma_{эфф}$ в возможном интервале температур 170–220 К не превышает 2% и менее 1% для ширины спектра более 7 нм. Таким образом, повышение точности определения концентрации примеси вызывает необходимость увеличения ширины линии генерации до величин порядка 7–8 нм, одновременно снижая величину $\sigma_{эфф}$.

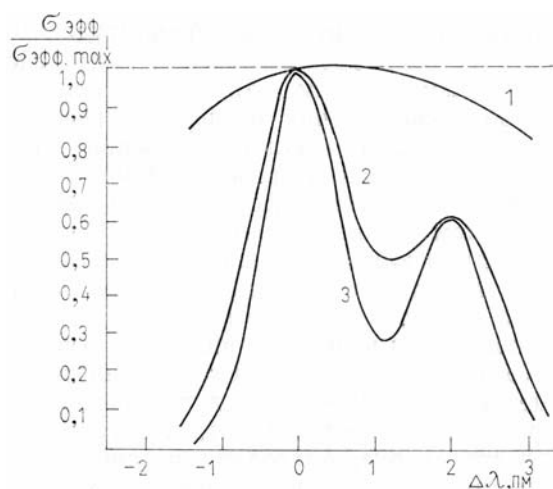


Рис. 3. Зависимость $\sigma_{эфф}$ от расстройки длины волны излучения: 1 — зависимость $\sigma_{эфф}$ от расстройки для ширины линии $\Delta\lambda$, равной 8 нм; 2 — зависимость $\sigma_{эфф}$ от расстройки для величины $\Delta\lambda = 1$ нм; 3 — профиль резонансной D_2 линии натрия для $T = 200$ К

На рис. 3 представлена нормированная кривая изменения $\sigma_{эфф}$ от расстройки для выбранной ширины спектральной линии, равной 8 нм. Для сравнения на рисунке также представлена зависимость $\sigma_{эфф}$ от расстройки для ширины линии 1 нм и спектральный профиль поглощения D_2 линии натрия при температуре 200 К. Характер изменения $\sigma_{эфф}$ для ширины спектра 8 нм заметно снижает требования к спектральной стабильности излучения и точности настройки. В интервале изменения длины волны генерации более 1,5 нм ($-0,3 \div 1,4$ нм) величина $\sigma_{эфф}$ изменяется в пределах лишь 2% вблизи своего максимального значения. Следует отметить, что длина волны, соответствующая максимальному значению поперечника резонансного рассеяния для линий излучения с шириной более 2 нм, смещается относительно максимального значения D_{2a} линии поглощения.

Настройка генератора на длину волны D_2 линии натрия производится в два этапа. На первом этапе используется линзовый спектроскоп с дифракционной решеткой 1200 штр./мм, работающий во втором порядке. С помощью угловой перестройки внутрирезонаторных интерферометров линия лазерного излучения совмещается визуально по матовому стеклу с натриевой D_2 линией от спектральной лампы, помещенной перед щелью спектроскопа. На втором этапе производится точная настройка длины волны генерации по максимальной интенсивности переизлучения в резонансной камере, которое регистрируется ФЭУ. Резонансная камера представляет собой отпаянную кювету с парами натрия в вакууме, нагретую до температуры 140°C для получения эффекта резонансного рассеяния достаточной интенсивности от проходящего через нее излучения лазера. Ширина спектрального контура переизлучения определяется в основном доплеровским уширением и равняется 1,8 пм.

Точность настройки по одиночному импульсу ограничивалась флуктуациями амплитуды импульса настройки, которые оказались в пределах 5% вблизи максимального значения. Эти флуктуации определялись некоторой нестабильностью энергии генерации от вспышки к вспышке, а также ширины и формы спектральной линии излучения лазера. В дальнейшем имеется возможность значительного повышения точности данного метода настройки посредством суммирования и анализа амплитуд нескольких импульсов. Амплитуда импульса настройки является характеристикой эффективности взаимодействия лазерного излучения с атмосферным натрием, однако эта зависимость не является непосредственной из-за отличия температур резонансной камеры, используемой для контроля длины волны излучения и температуры, соответствующей высотам локализации примеси. Измерения и расчеты, сделанные в предположении гауссовой формы спектральных линий, показывают, что с увеличением ширины спектра линии генерации более 3 пм изменение амплитуды отклика резонансной камеры практически совпадает с изменением $\sigma_{\text{эфф}}$ при аналогичной расстройке. Таким образом, примененная система настройки вполне пригодна для исследований с шириной спектральной линии излучения вплоть до 3 пм.

Контроль длины волны генерации по сигналу с резонансной камеры осуществлялся непрерывно в течение всего цикла наблюдений. Обычно настройка сохраняется вплоть до нескольких сотен импульсов без вмешательства извне, благодаря пассивной стабилизации параметров селективного резонатора, осуществляемой посредством термостабилизации интерферометров с точностью до 0,2°C и температуры раствора красителя с точностью 1°C.

1. Лагутин М.Ф., Мегель Ю.Е., Петров Н.Н. и др. — ДАН СССР, 1981, т. 258, с. 334.
2. Megie G., Blamont J.E. — Planet. Space Sci., 1977, v. 25, p. 1093.
3. Clemesha V.R., Simonich D.M., Batista P.P., Kirchhoff V.W.J.H. — J. Geophys. Res., 1982, v. 87, p. 181.
4. Ветохин С.С., Гулаков Н.Р., Перцев А.Ф., Резников Н.В. Одноэлектронные фотоприемники. М.: Атомиздат, 1979.
5. Лагутин М.Ф., Мустецов Н.П., Зарудный А.А. — Приборы и техника эксперимента, 1984, № 2, с. 178.
6. Зуев В.Е., Хинкли Э.Д. Лазерный контроль атмосферы. М.: Мир, 1979.
7. Чемберлен Дж. Физика полярных сияний. М.: ИЛ, 1963.

Харьковский институт радиоэлектроники
им. акад. М.К. Янгеля

Поступила в редакцию
29 января 1988 г.

A. A. Zagudny, Yu. E. Megel, M. F. Lagutin. **Lidar System for Monitoring Mesospheric Trace Gases.**

A laser radar system for detecting atmospheric sodium using the resonance fluorescence effect is described. The lidar employs a flash lamp—excited organic dye solution laser as a transmitter. The lidar parameters are considered with a special emphasis, on the laser bandwidth because it is essential for monitoring trace atmospheric components. Laser bandwidth calculations accounting for Doppler broadening of sodium line width at mesospheric temperatures are reported. For the laser bandwidth exceeding, the Na absorption line width the uncertainty σ_{eff} is shown to be not more than 2%. The concentration measurement accuracy for the trace species of interest is found to depend on the laser bandwidth and stability.