

УДК 551.510

В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин

**ПАРАМЕТРЫ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ЛИДАРА ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ
МОЛЕКУЛЯРНОГО ЙОДА В АТМОСФЕРЕ**

На основе численного решения лидарного уравнения рассмотрена возможность зондирования изотопов йода в атмосфере флуоресцентным методом. В качестве источника возбуждения флуоресценции взято излучение второй гармоники Nd – YAG-лазера, анализируются варианты зондирования другими лазерными источниками. Минимально детектируемое значение концентрации йода для дистанций зондирования от 0,5 до 10 км составляет 10^{10} см^{-3} при пиковой мощности зондирующего импульса 10 МВт.

Излучение YAG:Nd-лазера и особенно его третьей и четвертой гармоник широко используется в системах дистанционных флуориметров [1] и позволяет получить импульсы длительностью 10 нс с энергией от 1 до 100 мДж при частоте следования до 50 Гц. Излучение гармоник такого лазера может найти применение для дистанционного зондирования молекулярного йода в атмосфере флуоресцентным лидаром (ФЛ).

Исследования газоразрядных лазеров, стабилизированных по поглощению в йоде [2–5], позволили уточнить атлас йода [6] и дать дополнительные сведения [7, 8] в атлас йода, содержащий сотни тысяч линий [9]. Исследовалась лазерная флуоресценция паров йода [10, 11].

Импульсные газовые лазеры на парах меди также могут найти применение в флуоресцентном зондировании молекулярного йода в атмосфере [12]. Лазерные импульсы медного лазера длительностью 10 нс с частотой следования до 20 кГц могут иметь пиковые мощности до 130 кВт [13]. Кроме того, использование режима накопления N импульсов при регистрации сигнала флуоресценции позволяет иметь дистанцию зондирования, соответствующую эффективной мощности, равной $PN^{1/2}$ [13].

Для сравнения приведены результаты для эксимерного лазера на молекулах XeCl, который широко используется в системах ФЛ зондирования и позволяет получать импульсы длительностью 10 нс с энергией до 0,1 Дж на длине волны 308 нм при частоте следования до 50 Гц [1].

В связи с этим представляет интерес численное решение лидарного уравнения для флуоресценции молекул $^{127}\text{I}_2$ и его изотопных аналогов для всех перечисленных лазеров с целью выбора длины волны излучателя ФЛ для обнаружения минимально возможной концентрации молекул йода.

Лидарное уравнение для флуоресценции представлено в виде [1]

$$P(\lambda_1, R) = P_0(\lambda_0) K_1 \Delta R A_2 T(\lambda_0) T(\lambda_1) \frac{d\sigma_p}{d\Omega} N_a I R^{-2}, \quad (1)$$

где $P(\lambda, R)$ – мощность сигнала ФЛ на фотоприемнике на длине волны λ_p , приходящая с расстояния R ; $P_0(\lambda_0)$ – мощность лазера и его длина волны; K_1 – постоянная лидара; ΔR – шаг по расстоянию; A_2 – площадь приемного телескопа; $T(\lambda_1)$, $T(\lambda_1)$ – пропускание атмосферы соответственно на длине лазерного излучения и сигнала ФЛ; $(d\sigma_p/d\Omega)$ – дифференциальное сечение флуоресценции исследуемой молекулы; N_a – концентрация молекул; R – расстояние до точки зондирования.

Длина волны максимума полосы флуоресценции для молекул I_2 равнялась 589,5 нм, дифференциальное сечение на этой длине волны – $6,1 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2/\text{ср}$, фактор тушения – 10^{-3} и время затухания флуоресценции 1000 нс [1].

Далее для изучаемого лидара выделим в K_1 множитель $\xi_p(\lambda)$, зависящий от спектральной чувствительности фотокатода ФЭУ, в виде

$$K_1 = K_2 \xi_p(\lambda). \quad (2)$$

Остальные множители в уравнении (1) имеют следующие значения: $\Delta R = 200$ м для времени измерения $\tau = 1000$ нс; $A_2 = 0,008 \text{ м}^2$; $K_2 = 0,495$ для длины волны 532 нм (результат измерений); пиковая мощность лазерного импульса $P_0 = 10$ МВт; расстояние зондирования $R = 0,5; 1; 2; 5$ и 10 км; концентрация исследуемых молекул 10^{16} см^{-3} ; значение спектральной чувствительности фотокатодов ФЭУ-79 для выбранной длины волны 589,5 нм взято из [14] и приведено во втором столбце табл. 1. Пропускание атмосферы рассчитывалось, как и в [1], по формуле

$$T(\lambda, R) = \exp \left[- \int_0^R k(\lambda) dR \right] \quad (3)$$

и значениям коэффициента ослабления k , которые взяты из [15], и для интересующих нас длин волн представлены в первом столбце табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента ослабления в атмосфере относительной спектральной чувствительности ФЭУ и спектральной яркости фонового излучения Солнца, рассчитанные для длин волн лазеров и полосы флуоресценции молекул йода

λ , нм	k , км ⁻¹	ξ_p	S_b , 10 ³ Вт/м ² ст · нм
589,5	0,159	0,54	16,0
532	0,16	–	–
355	0,31	–	–
266	0,785	–	–
578	0,158	–	–
510	0,172	–	–
289	0,53	–	–
271	0,70	–	–
308	0,45	–	–

С помощью приведенных выше данных были сделаны численные расчеты мощности ФЛ по уравнению (1) для этого значения концентрации исследуемых молекул выбранных длин волн и импульсной мощности всех лазеров в диапазоне расстояний зондирования от 0,5 до 10,0 км с целью поиска оптимального варианта лидарной системы. Результаты расчетов для молекулы I₂ приведены в табл. 2. Из табл. 3 следует, что с увеличением расстояния сигнал ФЛ уменьшается на порядок на первом километре и еще на четыре порядка на следующих девяти километрах. Анализ этих результатов показывает, что оптимальным является использование в такой системе второй гармоники YAG:Nd-лазера с длиной волны 532 нм и излучения медного лазера с длинами волн 510 и 578 нм, которые позволяют получить максимальное значение мощности ФЛ для молекул йода в диапазоне расстояний 0,5–10 км.

Таблица 2

Результаты расчетов мощности ФЛ молекул I₂ для длин волн всех лазеров мощностью 10 МВт, концентрации молекул 10¹⁶ см⁻³ и фоновой мощности для дистанций зондирования 0,5–10 км

R , км	0,5	1	2	5	10
Молекула I ₂					
λ , нм	P_m , мкВт				
532	707,9	150,9	2,742	1685,0	84,71
355	656,8	129,9	2,031	795,8	18,89
268	517,9	82,4	0,785	74,03	0,16
578	708,2	151,1	2,748	1694,0	85,51
510	703,7	149,1	2,677	1578,0	75,11
289	588,3	104,2	1,309	265,1	2,10
271	540,4	87,9	1,304	113,3	0,38
308	612,3	112,9	1,535	395,3	4,66
Фон					
λ , нм	P_m , мВт	P_m , нВт	P_m , пВт	P_m , пВт	P_m , фВт
589,5	1,517	350,2	74,68	7,417	837,2

Таблица 3

Результаты расчетов минимально детектируемых лидаром концентраций молекул йода для всех выбранных лазеров мощностью 10 МВт и дистанций зондирования 0,5 – 10 км

R , км	0,5	1	2	5	10
λ , нм	N_a , см ⁻³				
532	2,14·10 ¹⁰	2,32·10 ¹⁰	2,72·10 ¹⁰	4,40·10 ¹⁰	9,88·10 ¹⁰
355	2,31·10 ¹⁰	2,70·10 ¹⁰	3,68·10 ¹⁰	9,32·10 ¹⁰	4,43·10 ¹¹
266	2,93·10 ¹⁰	4,25·10 ¹⁰	9,51·10 ¹⁰	1,00·10 ¹²	5,12·10 ¹³
578	2,14·10 ¹⁰	2,32·10 ¹⁰	2,72·10 ¹⁰	4,38·10 ¹⁰	9,79·10 ¹⁰
510	2,16·10 ¹⁰	2,35·10 ¹⁰	2,79·10 ¹⁰	4,67·10 ¹⁰	1,12·10 ¹¹
289	2,58·10 ¹⁰	3,36·10 ¹⁰	5,71·10 ¹⁰	2,80·10 ¹¹	3,99·10 ¹²
271	2,81·10 ¹⁰	3,98·10 ¹⁰	5,73·10 ¹⁰	6,55·10 ¹¹	2,22·10 ¹³
308	2,48·10 ¹⁰	3,10·10 ¹⁰	4,86·10 ¹⁰	1,88·10 ¹¹	1,80·10 ¹²

Однако все эти расчеты выполнены при условии отсутствия фоновой засветки или для ночного зондирования. Так как фоновое излучение Солнца оказывает сильное влияние на регистрируемую лидаром мощность ФЛ, были выполнены расчеты фоновой мощности на фотоприемнике $P_b(\lambda, R)$ и рассмотрено влияние фоновой засветки на потенциальные возможности лидара. Значение спектральной яркости солнечного излучения для различных времен года, времени суток и метеословий взяты из [16]. Для работы лидара были выбраны самые тяжелые условия: яркий солнечный день. С использованием данных [1, 17, 18] (из-за неопределенности положения оси телескопа относительно направления на Солнце) была определена яркость фонового излучения $S_b(\lambda)$, приведенная в последнем столбце табл. 1. С помощью этих значений по уравнению

$$P_b(\lambda, R) = S_b(\lambda) T(\lambda, R) K_2 \xi_p(\lambda) A_2 \Omega(R) \Delta\lambda, \quad (4)$$

где $\Omega(R)$ – телесный угол поля зрения приемного телескопа; $\Delta\lambda$ – спектральная ширина приемного тракта, аналогичному [18], были рассчитаны значения фоновой мощности $P_b(\lambda, R)$ для нашего случая. Считая, в соответствии с [1], минимально допустимым отношение сигнала к шуму (С/Ш) равным 1,5, определим минимально обнаруживаемую лидаром мощность P согласно уравнению

$$P_m = (C/Ш) P_b(\lambda, R). \quad (5)$$

Полученные результаты расчетов представлены в последней строке табл. 2. Сравнение этих результатов с данными табл. 3 позволяет заключить, что наибольшее превышение мощности ФЛ над фоновой получено для тех же длин волн для всего диапазона расстояний. Причем лазер мощностью 10 МВт на этих длинах волн позволит зарегистрировать на любом расстоянии из этого диапазона концентрацию молекул от $2 \cdot 10^{10}$ до 10^{11} см⁻³, тогда как для такой же мощности на других длинах волн значение концентрации будет $2 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Кроме того,

следует иметь в виду, что высокая частота следования импульсов медного лазера дает возможность без потери пространственного разрешения повысить мощность ФЛ в режиме накопления сигнала по N импульсам в $N^{1/2}$ раз. Дальнейшее повышение чувствительности лидара может быть достигнуто увеличением диаметра приемного телескопа, но это ведет к резкому увеличению массы и габаритов лидарной системы. Использование же ретроотражателей типа углового или топографической мишени в схеме ФЛ позволит увеличить мощность в 1,2–1,3 раза, но не приведет к потере пространственного разрешения ФЛ [1].

Таким образом, полученные результаты показывают возможность оптимального выбора длины волны лазерного излучения для зондирования молекулярного йода в атмосфере на заданном расстоянии. Причем даже в самых тяжелых фоновых условиях можно выбрать длину волны лазера, которая позволит зарегистрировать требуемую концентрацию исследуемых молекул.

1. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. *Привалов В.Е.* Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Минск: Ин-т физики БАН, 1979.
3. *Привалов В.Е.* Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. Л.: Судостроение, 1989. 260 с.

4. *Яценко Л.П.* Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Киев: Ин-т физики АНУ, 1995.
5. *Скворцов М.Н.* Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск: Ин-т лазерной физики РАН, 1996.
6. *Gerstencorn S., Luc P.* Atlas du spectre d'absorption de la molecule de l'iode 14800–20000 cm^{-1} Paris, 1978.
7. *Голикова Е.В., Привалов В.Е.* СПб, 1992. 48 с. (Препринт Ин-т АП РАН, N 53).
8. *Иванов В.А., Привалов В.Е.* Применение лазеров в приборах точной механики. СПб: Политехника, 1993. 217 с.
9. *Миронов В.А., Привалов В.Е., Савельев С.К.* // Тезисы докладов 4-й ШСВ «Лазеры и современное приборостроение». СПб: РЦЛФ, 1996. С. 15.
10. *Засна Ю.П., Киреев С.В., Проценко Е.Д.* // ЖПС. 1991. Т. 55. N 4. С. 563.
11. *Засна Ю.П., Киреев С.В., Проценко Е.Д.* // ЖПС. 1992. Т. 56. N 2. С. 116.
12. *Воробьева Л.П., Евтушенко Е.С., Клишкин В.М., Макагон М.М., Соковников В.Н., Филонова Н.А., Чукуров В.А.* // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 11. С. 1648.
13. *Вицинский С.А., Дивин В.Д., Келлер А.В., Ловчий И.Л., Светлых А.А.* // Оптический журнал. 1996. N 5. С. 83.
14. *Справочник по лазерам. Т. II* / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. 134 с.
15. *Справочник по лазерам. Т. I* / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. 382 с.
16. *Camagni P.* Lidar applications to aerosols and particles Optical Remote Sensing of Air Pollution. Lectures of a Course. P. Camagni and S. Sandroni. Ispra Italy. 1983. P. 205–253.
17. *Posen H., Pobish* // Appl. Optics. 1975. V. 14. N 8. P. 2703–2706.
18. *Inaba H., Kobayasi T.* // Opto-Electronics. 1972. V. 4. N 2. P. 101–123.

Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
3 ноября 1997 г.

V.E. Privalov, V.G. Shemanin. **Characteristics of Fluorescent Lidar for Sounding of Atmospheric Iodine.**

Based on numerical solution of the lidar equation, the possibility for sounding of iodine isotopes in the atmosphere by the fluorescence method has been studied. As a source of the fluorescence excitation, the second harmonic radiation of Nd–YAG-laser is taken; the variants of the sounding with other laser sources are under analysis. The minimally detectable value of iodine concentration is 10^{10} cm^{-3} at the sounding distance from 0.5 to 10 km and peak power of the pulse of 10 MW.