

# Перестраиваемый CO<sub>2</sub>-лазер с генерацией на секвенциальных и горячих переходах

Ю.Н.Булкин, Е.А.Кудряшов, С.А.Новиков, М.Ю.Дерюгин, А.А.Кузнецов

*Теоретически и экспериментально исследована схема резонатора с отражательной дифракционной решеткой, обеспечивающей высокую частотную селективность, широкий спектральный интервал и низкий уровень потерь на выделяемой частоте. Рассчитаны и проанализированы частотно-селективные свойства указанного резонатора. Установлено, что зависимость приращения потерь от диаметра диафрагмы при фиксированной частотной отстройке  $\Delta\nu$  носит немономонный характер. Экспериментально получена генерация на 100 линиях традиционных полос и 36 линиях секвенциальных и горячих переходов. Минимальное расстояние между разрешаемыми линиями  $\Delta\nu_L$  составляло  $\sim 0.2$  см<sup>-1</sup>.*

**Ключевые слова:** CO<sub>2</sub>-лазер, оптический резонатор, спектр излучения.

## 1. Введение

В последнее время в области экологического мониторинга атмосферы значительные успехи достигнуты на базе метода оптоакустической спектроскопии с использованием перестраиваемых по линиям CO<sub>2</sub>-лазеров [1, 2]. Однако их возможности используются далеко не в полной мере, поскольку в подавляющем большинстве случаев реализуется генерация только на традиционных переходах.

В то же время, наличие в спектре излучения линий секвенциальных и горячих полос позволит снизить на два порядка уровень фоновых сигналов, повысить чувствительность измерений и существенно расширить круг детектируемых веществ. Поэтому представляет практический интерес разработка перестраиваемых CO<sub>2</sub>-лазеров, излучающих на линиях как традиционных 00<sup>0</sup>1 – [10<sup>0</sup>0, 02<sup>0</sup>0], так и секвенциальных 00<sup>0</sup>*n* – [10<sup>0</sup>(*n* – 1), 02<sup>0</sup>(*n* – 1)] (где *n* > 1) и горячих 01<sup>1</sup>1 – 11<sup>1</sup>0 полос.

Следует заметить, что для CO<sub>2</sub>-лазеров, характеризующихся широким диапазоном спектра генерации и жесткой конкуренцией лазерных переходов, проблема селекции линий секвенциальных и горячих полос осложняется их близким расположением и значительной разницей в усилении с линиями традиционных переходов.

Известен метод селекции с помощью внутррезонаторной нагреваемой ячейки с CO<sub>2</sub>, вносящей селективные потери на основных переходах [3]. Однако такое решение имеет ряд недостатков: дестабилизирующее действие теплового источника, дополнительные неселективные потери, инерционность переключения переходов, увеличение габаритов лазерной системы и т. п.

Ю.Н.Булкин, Е.А.Кудряшов, С.А.Новиков, М.Ю.Дерюгин. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37  
А.А.Кузнецов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 27 ноября 2003 г., после доработки – 19 мая 2004 г.

Использование резонаторов с интерференционными элементами, обладающих высокой частотной селективностью, не пригодно для решения данной задачи из-за небольшой ширины спектрального интервала. Комбинированные резонаторы с двумя дисперсионными элементами сложны и очень чувствительны к разъюстировкам.

В данной работе рассматривается возможность разработки такого лазера на базе стандартной промышленной газоразрядной трубки ИЛГН-501 с дифракционной решеткой (ДР) в качестве дисперсионного элемента.

## 2. Выбор схемы резонатора

Предпринятые в [4] попытки выделения секвенциальных переходов, используя резонатор с дифракционной решеткой (ДР) в качестве дисперсионного элемента, привели к получению линий *P*(27)–*P*(43) перехода 00<sup>0</sup>2 – 10<sup>0</sup>1, для которых минимальное расстояние до ближайшего основного перехода составляет 0.63 см<sup>-1</sup>.

Оптимизация параметра конфокальности *g* и числа Френеля *N<sub>F</sub>*, проведенная в [5] для лазера с ДР в автоколлимационной установке и с аналогичными [4] длинами резонатора (*L<sub>r</sub>* ~ 137 см) и активной среды (*L<sub>a</sub>* ~ 100 см), позволила лишь незначительно улучшить ситуацию: в *P*-ветви перехода 00<sup>0</sup>2 – 10<sup>0</sup>1 дополнительно выделена линия с *J* = 25, удаленная на 0.57 см<sup>-1</sup> от соседней с ней линии основного перехода. Дальнейшее и заметное повышение селективности данной схемы возможно только при значительном увеличении ее габаритов. Причем, поскольку в этих резонаторах скорость нарастания потерь при отстройке от выделяемой частоты приблизительно пропорциональна  $\sqrt{L_r}$  (при фиксированных *g* и *N<sub>F</sub>*) [6], для двукратного улучшения остроты селекции необходимо использовать лазерную систему длиной не менее 5.5 м.

Это побудило нас использовать схему, в которой излучение при круговом обходе резонатора дважды отражается от дифракционной решетки. Предлагаемая конфигурация изображена на рис.1,а. Здесь, в отличие от схемы, описанной в [4] (см. рис.1,б), решетка расположена

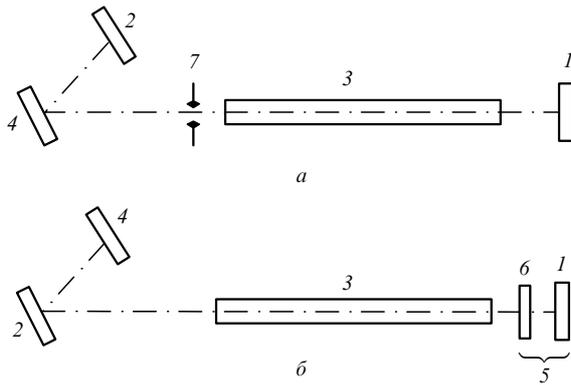


Рис.1. Схема исследуемого (а) и комбинированного (б) резонаторов: 1, 2 – сферические зеркала; 3 – активная среда; 4 – дифракционная решетка; 5 – отражающий интерферометр; 6 – дифракционный селектор; 7 – диафрагма.

между зеркалами и отсутствует второй дисперсионный элемент – отражающий интерферометр 5, образованный глухим зеркалом 1 и дифракционным селектором 6 [7].

Аналогичная конфигурация использовалась для селекции секвенциальных переходов в работе [8]. Наша схема отличается от нее наличием апертурной диафрагмы 7 с регулируемым диаметром  $d$ , которая существенно влияет на селективность.

### 3. Методика и результаты расчета

Уровень потерь наиболее добротной поперечной моды исследуемого резонатора определялся из уравнения, накладывающего условие самовоспроизведения (с точностью до постоянного коэффициента) пространственной конфигурации поля при круговом обходе,

$$\gamma u = \hat{K}u, \quad (1)$$

где  $u$  – распределение поля в плоскости, выбранной в качестве опорной; оператор  $\hat{K}$  обозначает преобразование поля при круговом обходе резонатора; комплексная константа  $\gamma$  определяет затухание моды и фазовый набег при круговом обходе.

Уравнение (1) решалось численно методом итераций [9, 10]. Трансформация поля при распространении между оптическими элементами резонатора вычислялась с помощью известного выражения

$$u(x_2, y_2) = \iint_{S_n} \frac{\exp(ikL_m)}{i\lambda L_m} \exp \left\{ \frac{ik}{2L_m} [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] \right\} u(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (2)$$

где  $u(x_1, y_1)$  – исходное распределение поля в плоскости одного из элементов;  $u(x_2, y_2)$  – распределение поля после прохождения участка длиной  $L_m$  ( $m = 1, 2, 3$ );  $k = 2\pi/\lambda$ . Интегрирование проводилось в пределах круглых апертурных диафрагм  $S_n$ :  $\{x \in [-A_n, A_n], y \in [-(A_n^2 - x^2)^{1/2}, (A_n^2 - x^2)^{1/2}]\}$  ( $n = 1, 2$ ), где  $2A_1$  – апертура зеркал и ДР,  $2A_2 = d$  – диаметр диафрагмы 7. Сферические зеркала 1 и 2 рассматривались как квадратичный фазовый корректор и их влияние учитывалось добавлением фазового множителя  $\exp[-(ik/R_j)(x^2 + y^2)]$  ( $j = 1, 2$ ). Дифракционная решетка моделировалась эквивалентным пло-

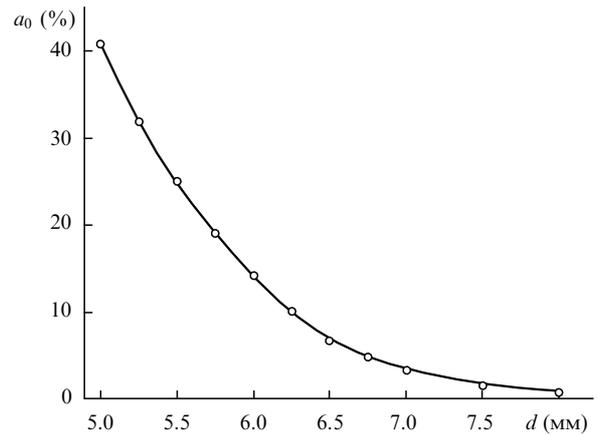


Рис.2. Зависимость уровня неселективных потерь  $a_0$  от диаметра диафрагмы  $d$ .

ским зеркалом с переменным углом разъюстировки  $\alpha$ , связанным с отстройкой  $\Delta\nu = \nu - \nu_0$  относительно выделяемой частоты  $\nu_0$  формулой  $\alpha = (\Delta\nu/\nu_0) \tan \varphi_0$ , где  $\varphi_0$  – угол автоколлимации для частоты  $\nu_0$ . Преобразование поля при отражении от плоского зеркала, наклоненного на угол  $\alpha$ , учитывалось умножением на выражение  $\exp(-ik2x\alpha)$ . Влиянием линзового эффекта при прохождении излучения через активную среду пренебрегалось.

С использованием указанной методики были рассчитаны частотно-селективные зависимости и уровень неселективных потерь в диапазоне длин волн 9.2–11.2 мкм для резонатора, параметры которого были таковы: расстояние между зеркалом 1 и диафрагмой  $L_1 = 125$  см, между диафрагмой и решеткой  $L_2 \sim 13$  см, зеркало 2 было расположено на расстоянии  $L_3 = 22$  см от решетки. Радиусы кривизны зеркал 1 и 2 составляли  $R_1 = 3$  м,  $R_2 = 7$  м, дифракционная решетка имела 150 штр./мм (угол блеска около  $54^\circ$ ). Диаметры апертур зеркал и решетки равнялись 14 мм, диаметр апертурной диафрагмы изменялся в пределах от 5 до 8 мм.

Исследовались свойства резонатора при различных размерах апертурной диафрагмы. Установлено, что уровень неселективных потерь  $a_0$  монотонно убывает при увеличении диаметра диафрагмы от 5.0 до 8.0 мм. В частности, в области  $\lambda = 10.6$  мкм он, изменяясь от 40 % до 0.8 %, покрывает практически весь диапазон потерь, приемлемых для лазера с активной средой длиной  $\sim 100$  см (см. рис.2). В то же время, зависимость приращения потерь  $\Delta a = a - a_0$  от диаметра диафрагмы при фиксированной величине частотной отстройки  $\Delta\nu$  носит немонотонный характер. Причем значение диаметра, при котором наблюдается максимум селективных потерь, увеличивается с ростом  $\Delta\nu$ . Соответствующие графики приведены на рис.3. Так, например, для частотной отстройки  $\Delta\nu = 10$  ГГц (кривая 1) наибольшее приращение потерь,  $\Delta a = 28$  %, достигается при диаметре 5.5 мм. Для отстроек  $\Delta\nu = 20$  и 35 ГГц (кривые 2, 3) соответствующие значения  $d$  составляют 6.25 ( $\Delta a = 66$  %) и 7 мм ( $\Delta a = 84$  %).

Дополнительную информацию о селективности исследуемого резонатора можно получить из рис.4, на котором представлены частотные зависимости потерь при различных диаметрах диафрагмы. Там же для сравнения показана наиболее крутая из аналогичных зависимостей для резонатора с дифракционной решеткой в автоколлимационной установке (длина резонатора и дисперсия решетки для обоих случаев одинаковы).

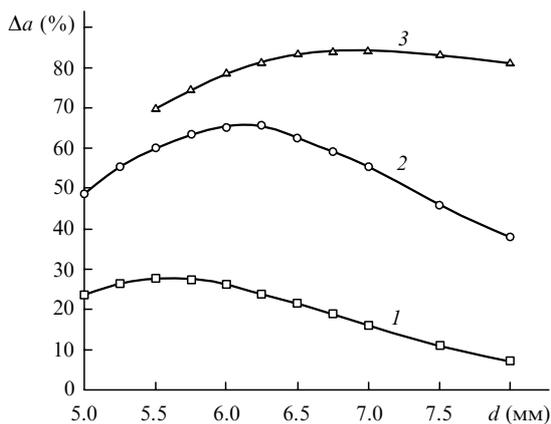


Рис.3. Зависимость приращения потерь  $\Delta a$  от диаметра диафрагмы  $d$  при фиксированной величине частотной отстройки  $\Delta \nu = 10$  (1), 20 (2) и 35 ГГц (3).

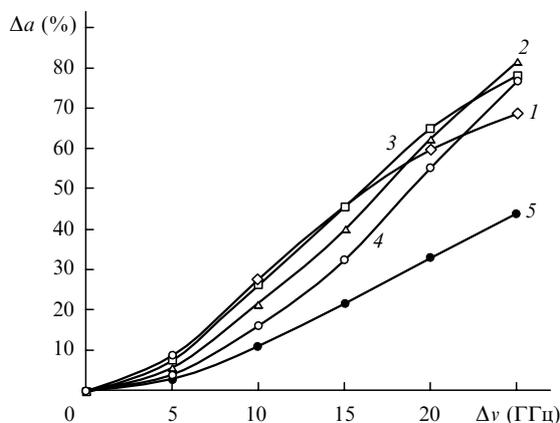


Рис.4. Зависимость приращения потерь от частотной отстройки при различных диаметрах диафрагмы:  $d = 5.5$  (1), 6 (2), 6.5 (3) и 7 мм (4). Кривая 5 – зависимость для автоколлимационной схемы.

Из рис.4 видно заметное улучшение селективности предложенной конфигурации по сравнению с традиционной автоколлимационной схемой. Кроме того, приведенные данные позволяют выбирать размеры апертурной диафрагмы в зависимости от решаемых задач. В частности, в нашем случае для выделения близко лежащих нетрадиционных линий ( $\Delta \nu \leq 10$  ГГц) диаметр диафрагмы должен составлять  $\sim 5.5 - 6$  мм. В то же время, для подавления линий, отстоящих от селектируемой на большее расстояние ( $\Delta \nu \geq 25$  ГГц), например, при селекции основных переходов,  $d$  следует увеличить.

#### 4. Схема установки и результаты эксперимента

Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис.5, была аналогична описанной в [5]. Перестраиваемый по линиям CO<sub>2</sub>-лазер состоял из активного элемента 2 (стандартной промышленной газоразрядной трубки ИЛГН-501) с одним внутренним сферическим зеркалом 4 с радиусом кривизны  $R_1 = 3$  м. Длина активной среды составляла 100 см. Спектральные характеристики лазерного излучения измерялись с помощью панорамного спектрографа. Мощность генерации регистрировалась с помощью измерителя мощности ИМО-4.

Разработанный CO<sub>2</sub>-лазер позволяет селектировать 100 линий традиционных полос, в том числе 52 линии перехода  $00^01 - 10^00$  ( $P(4) - P(56)$  и  $R(2) - R(50)$ ) и 48 линий перехода  $00^01 - 02^00$  ( $P(4) - P(52)$  и  $R(4) - R(48)$ ). Помимо этого получена генерация на 36 линиях секвенциальных и горячих полос, из них 17 линий перехода  $00^02 - 10^01$  ( $P(11) - P(43)$ ) и 19 линий перехода  $01^11 - 11^10$  ( $P(14) - P(32)$ ).

Минимальное расстояние между разрешаемыми линиями, каковыми в нашем случае являются секвенциаль-

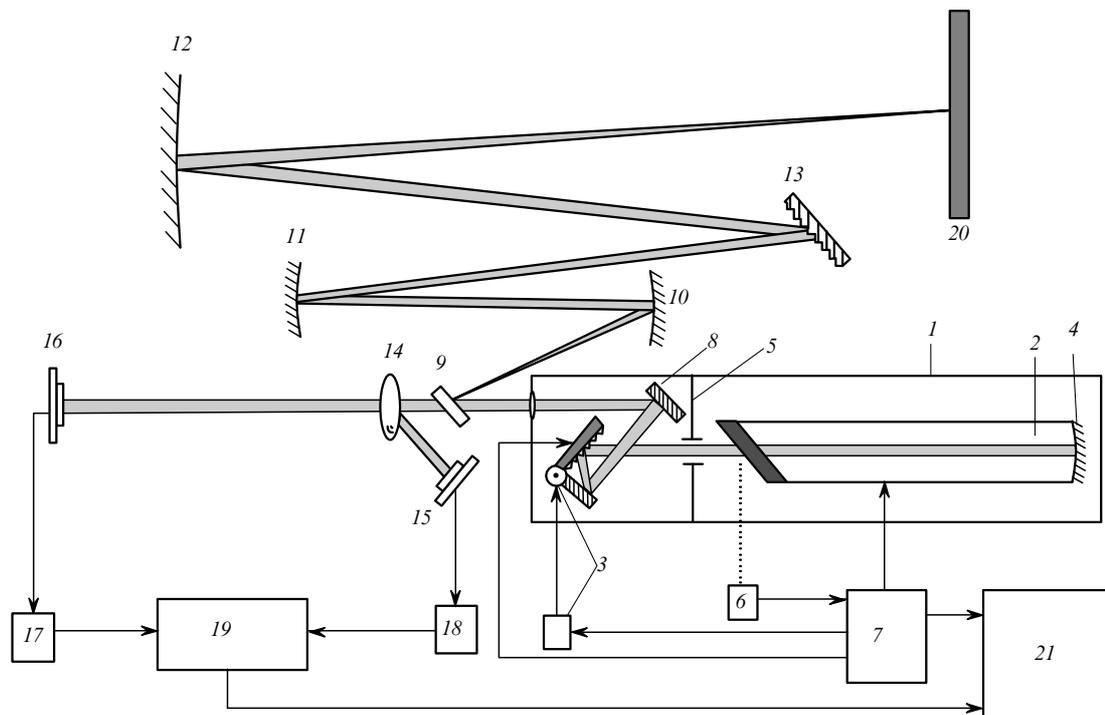


Рис.5. Схема экспериментальной установки:  
 1 – корпус; 2 – активный элемент; 3 – дифракционная решетка с уголковым отражателем и пьезокорректором; 4 – глухое зеркало; 5 – диафрагма; 6 – датчик (MG-30); 7 – блок питания; 8 – поворотное зеркало; 9 – полупрозрачная пластина из NaCl; 10–12 – сферические зеркала; 13 – дифракционная решетка; 14 – прерыватель; 15, 16 – датчики; 17, 18 – усилители; 19 – АЦП; 20 – термокран; 21 – ПК.

Табл.1.

Номер линии перехода $00^02-10^01$	Расстояние до ближайшего основного перехода ( $\text{см}^{-1}$ )	Условия эксперимента				Данная работа
		[4]*	[5]*	[8]**	[4]***	
P(11)	0.22	-	-	-	-	+
P(13)	0.27	-	-	-	+	+
P(15)	0.32	-	-	+	+	+
P(17)	0.37	-	-	+	+	+
P(19)	0.42	-	-	+	+	+
P(21)	0.48	-	-	+	+	+
P(23)	0.52	-	-	+	+	+
P(25)	0.57	-	+	+	+	+
P(27)	0.63	+	+	+	+	+
P(29)	0.66	+	+	+	+	+
P(31)	0.75	+	+	+	+	+
P(33)	0.81	+	+	+	+	+
P(35)	0.87	+	+	+	+	+
P(37)	0.92	+	+	+	+	+
P(39)	1.08	+	+	+	+	+
P(41)	1.04	+	+	-	+	+
P(43)	1.01	+	+	-	+	+

\* Резонатор с ДР в автоколлимационном режиме; \*\* резонатор с двухкратным отражением от ДР; \*\*\* резонатор с ДР и отражающим интерферометром.

ная P(11) и основная P(14),  $\Delta\nu_L = 0.22 \text{ см}^{-1}$ . Мощность генерации составляла от 0.05–0.2 Вт на линиях секвенциальных и горячих полос до 1–3 Вт на линиях основных полос молекулы CO<sub>2</sub>.

Для сравнения селективных свойств различных типов резонаторов в табл.1 приведены линии P-ветви перехода  $00^02-10^01$  и частотные отстройки до ближайшей к каждой из них линии основного перехода  $00^01-00^01$ . Знаком «+» отмечены линии, выделенные ранее и в данной работе с использованием следующих схем резонаторов: с ДР в автоколлимационном режиме, с двумя отражениями от ДР при круговом обходе, комбинированных с двумя дисперсионными элементами (интерферометр и ДР).

Из табл.1 видно, что представленные нами результаты превосходят полученные ранее даже при помощи более сложных комбинированных резонаторов, для которых  $\Delta\nu_L = 0.27 \text{ см}^{-1}$  при той же длине активной среды (1 м). Более заметное улучшение наблюдается по сравнению с результатами, полученными в работе [8] с использованием аналогичной схемы резонатора. В [8] при большей длине активной среды (1.5 м) обеспечивается разрешение  $\Delta\nu_L = 0.32 \text{ см}^{-1}$ , и в P-ветви перехода  $00^02-10^01$  выделено на 4 линии меньше.

## 5. Заключение

Теоретически и экспериментально исследована схема резонатора с отражательной дифракционной решеткой, обеспечивающего высокую частотную селективность, широкий спектральный интервал и низкий уровень потерь на выделяемой частоте.

Рассчитаны и проанализированы частотно-селективные свойства указанного резонатора. Установлено, что зависимость приращения потерь от диаметра диафраг-

мы при фиксированной частотной отстройке  $\Delta\nu$  носит немонокотонный характер. Причем значение диаметра, при котором наблюдается максимум селективных потерь, увеличивается с ростом  $\Delta\nu$ , что позволяет выбирать оптимальные для каждой из решаемых задач размеры апертурной диафрагмы.

Разработанный с использованием исследованной схемы перестраиваемый CO<sub>2</sub>-лазер при длине активной среды  $\sim 100 \text{ см}$  позволяет селективировать помимо 100 линий традиционных полос 36 линий на секвенциальных и горячих переходах. При этом минимальное расстояние между разрешаемыми линиями  $\Delta\nu_L$  составляет  $\sim 0.2 \text{ см}^{-1}$ .

Эти результаты превосходят полученные ранее при помощи аналогичной схемы с большей длиной активной среды (150 см), обеспечивающей разрешение  $\Delta\nu_L \sim 0.3 \text{ см}^{-1}$ , и схемы, использующей комбинированные резонаторы с двумя дисперсионными элементами при той же длине активной среды.

1. Адаменков А.А., Булкин Ю.Н., Бузовера В.В. и др. *Квантовая электроника*, **22**, 29 (1995).
2. Адаменков А.А., Булкин Ю.Н., Колобянин Ю.В., Кудряшов Е.А. *Оптика атмосферы*, **8**, 549 (1995).
3. Reid J., Siemsen K. *J. Appl. Phys.*, **48**, 2712 (1977).
4. Автономов В.П., Бельтюгов В.Н., Кузнецов А.А. и др. *Квантовая электроника*, **9**, 2155 (1982).
5. Bulkin Y.N., Adamenkov A.A., Kudryashov E.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3930**, 24 (2000).
6. Бельтюгов В.Н., Кузнецов А.А., Очкин В.Н. и др. *Труды ФИАН*, **221**, 6 (1992).
7. Троицкий Ю.В. *Одночастотная генерация в газовых лазерах* (Новосибирск: Наука, 1975, с. 160).
8. Solodukhin A.S. *J. Mod. Opt.*, **34** (4), 577 (1987).
9. Fox A.G., Li T. *Bell Syst. Tech.*, **40**, 453 (1961).
10. Kuznetsov A.A., Novgorodov M.Z. In *«Optical Resonators – Science and Engineering»* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998, p. 441).