

# Малогабаритные внутрирезонаторные лазерные спектранализаторы

А.Н.Колеров

Приведены основные характеристики малогабаритных внутрирезонаторных лазерных спектранализаторов и зарегистрированные с их помощью спектры исследованных веществ.

**Ключевые слова:** внутрирезонаторная лазерная спектроскопия, лазерное приборостроение, твердотельные лазеры.

Практически все имеющиеся к настоящему времени внутрирезонаторные лазерные спектранализаторы (ВРЛС) характеризуются значительными габаритами, весом и энергопотреблением. Это обстоятельство в определенной мере тормозит их широкое практическое использование.

Созданные нами малогабаритные ВРЛС предназначены для исследования сред, находящихся в различных агрегатных состояниях, – газа, жидкости, твердого тела и гетерогенной плазмы.

Принципиальная схема ВРЛС приведена на рис.1. В качестве источников излучения были использованы лазеры на стекле с ионами неодима [1], ГСГГ:Cr<sup>3+</sup> [2], BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Cr<sup>3+</sup> [3], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Ti<sup>3+</sup> [4], KZnF<sub>3</sub>:Cr<sup>3+</sup> [5], LiF:F<sub>2</sub><sup>+</sup>:F<sub>2</sub><sup>-</sup> [6] и NaF:F<sub>2</sub><sup>+</sup>:F<sub>2</sub><sup>-</sup> [7] с ламповой и лазерной накачкой. В последнем случае для когерентного возбуждения активных сред использовались неодимовый ( $W \leq 40$  Дж,  $\lambda = 1.06$  мкм) и рубиновый ( $W \leq 8$  Дж,  $\lambda = 0.69$  мкм) лазеры, работающие в режиме «длинного импульса» ( $\tau \sim 2$  мс).

При ламповой накачке активных сред применялись охлаждаемые квантроны с плотной упаковкой, поэтому интервал между импульсами генерации составлял 30–90 с. Изменением энергии и скорости накачки (за счет изменения LC разрядного контура) длительность импульса квазинепрерывного излучения регулировалась от десятков микросекунд до нескольких миллисекунд. Это позволило изменять чувствительность ВРЛС  $\chi$  в широком динамическом диапазоне, составляющем  $10^{-4}$ – $10^{-8}$  см<sup>-1</sup> (лазеры на кристаллах LiF:F<sub>2</sub><sup>+</sup>:F<sub>2</sub><sup>-</sup> [6]) и  $10^{-4}$ – $10^{-9}$  см<sup>-1</sup> (лазеры на стекле с неодимом и на NaF:F<sub>2</sub><sup>+</sup>:F<sub>2</sub><sup>-</sup>). При использовании других лазеров чувствительность ВРЛС была порядка  $10^{-8}$  см<sup>-1</sup> [2–5, 8, 9].

При создании «многоцветных» ВРЛС была исследована возможность возбуждения F<sub>2</sub><sup>+</sup>-центров окраски (ЦО) в кристаллах LiF и NaF, полосы поглощения которых ( $\Delta\lambda = 620$ –820 нм) перекрываются с диапазоном излучения лазеров на кристаллах ГСГГ:Cr<sup>3+</sup> ( $\lambda = 740$ –850 нм), BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Cr<sup>3+</sup> ( $\lambda = 700$ –820 нм), KZnF<sub>3</sub>:Cr<sup>3+</sup> ( $\lambda = 750$ –900 нм) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Ti<sup>3+</sup> ( $\lambda = 680$ –950 нм). Лазе-

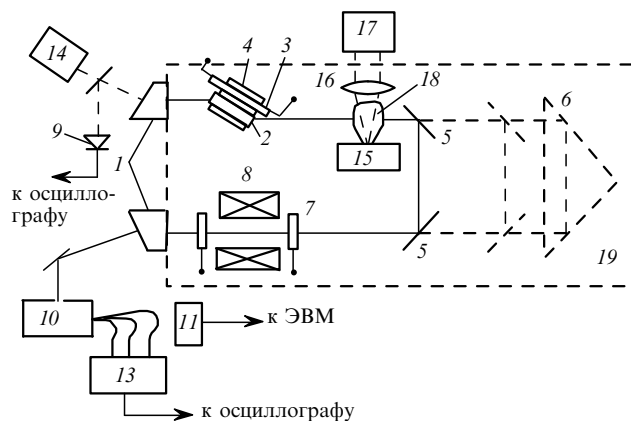


Рис.1. Принципиальная схема ВРЛС:

1 – зеркала резонатора; 2 – активная среда; 3 – лампа накачки; 4 – зеркальный отражатель; 5 – поворотные зеркала для измерения длины резонатора; 6 – призма-крыша; 7 – электроды плазменного источника; 8 – катушки соленоида; 9 – фотоприемник; 10 – полихроматор; 11 – ПЗС-регистратор; 12 – световолоконные диссекторы; 13 – блок ФЭУ и усилители ( $k \leq 10^6$ ); 14 – лазер накачки; 15 – мишень; 16 – линза; 17 – лазер ( $\lambda \sim 1.06$  мкм,  $E \sim 100$  Дж); 18 – светорезонный плазменный факел; 19 – герметичный корпус.

ры накачки работали в импульсном квазинепрерывном режиме, который обеспечивался конфокальной конфигурацией резонатора. В таблице приведены основные характеристики «многоцветных» ВРЛС.

При внутрирезонаторном возбуждении F<sub>2</sub><sup>+</sup>-ЦО, которое достигалось при размещении пластин NaF с F<sub>2</sub><sup>+</sup>-,

Тип лазера	$\tau_{\max}$ (мкс)	$W_{\max}$ (Дж)	$\Delta\lambda$ (нм)	$\chi$ (см <sup>-1</sup> )	$E_p$ (Дж)
ГСГГ:Cr <sup>3+</sup>	600	3.0	780–800	$10^{-8}$	–
BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> :Cr <sup>3+</sup>	600	2.5	750–770	$10^{-8}$	–
KZnF <sub>3</sub> :Cr <sup>3+</sup>	550	2.0	820–840	$10^{-8}$	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Ti <sup>3+</sup>	750	2.0	790–850	$10^{-8}$	–
LiF:F <sub>2</sub> <sup>+</sup>	560	–	910–930	$10^{-8}$	1.5–1.8
NaF:F <sub>2</sub> <sup>+</sup>	670	–	1110–1140	$10^{-8}$	0.5–0.6

Примечание:  $\tau_{\max}$  – максимальная длительность импульса излучения;  $W_{\max}$  – максимальная энергия импульса;  $\Delta\lambda$  – ширина спектра генерации;  $E_p$  – энергия импульса накачки;  $\chi$  определялось по 20% -ному провалу линии поглощения.

$F_2^{+*}$ -,  $F_2^{+**}$ -ЦО толщиной до 5 мм в резонаторах широкополосных лазеров накачки [16], наблюдалось изменение кинетики импульса генерации: лазеры генерировали пуг или отдельный импульс малой длительности ( $10^{-6}$ – $10^8$  с), т. е. реализовывался режим модуляции добротности. Проведенные эксперименты продемонстрировали возможность возбуждения ЦО в кристаллах LiF и NaF излучением широкополосных перестраиваемых лазеров, что обеспечивает чувствительность обнаружения коэффициента поглощения  $\chi \sim 10^{-8}$  см $^{-1}$  одновременно в разных спектральных диапазонах.

Для исследования спектров поглощения (или эмиссии) используются высокоразрешающие полихроматоры, обеспечивающие разрешение  $R \sim 10^6$  и обратную линейную дисперсию  $D \sim 0.5 - 1$  Å/мм [3, 4, 17]. При  $\lambda > 1$  мкм спектры поглощения (или эмиссии) регистрировались прямым фотографированием с последующей обработкой ИК фотопленок на микрофотометре с помощью линейки ПЗС, при  $\lambda < 1$  мкм – с последующей обработкой данных на ЭВМ с помощью световолоконных диссекторов [17] (входная апертура отдельного диссектора  $\sim 0.01 \times 10$  мм) в сочетании с ФЭУ. В последнем случае динамический диапазон измерительного тракта составлял  $10^8 - 10^9$  (погрешность измерения не более 15 %).

Созданные спектроанализаторы позволили провести исследование спектров поглощения и эмиссии сред, находящихся в различных агрегатных состояниях.

Технические газы, используемые для приготовления рабочих смесей CO $_2$ -, He-, Ar-, N $_2$ -, Kr- и Xe-лазеров, были исследованы на наличие примесей O $_2$ . Во всех случаях кислород фиксировался на уровне 0.1–1 %. Фрагменты спектра поглощения примесного кислорода при различных условиях приведены на рис.2. Чувствительность использованного ВРЛС на александрите [3] для молекулярного кислорода была не хуже  $10^{-3}$  мм рт. ст., поэтому примеси O $_2$  в технических газах регистрировались на уровне  $10^{-2}$  мм рт. ст. (рис.2,б).

Исследовалась также сорбирующая способность элементов разрядной трубки CO $_2$ -лазера. В откачанном до давления  $\sim 10^{-3}$  мм рт. ст. разрядном промежутке линии O $_2$  были практически не видны (рис.2,в). Однако после 10-минутного горения тлеющего разряда наблюдались линии O $_2$ , содержание которого соответствовало давлению

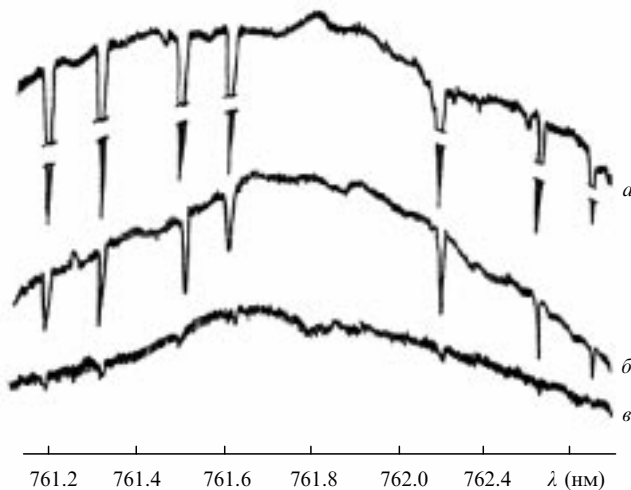


Рис.2. Фрагмент спектра поглощения примесного O $_2$  при давлении 1 (а),  $10^{-2}$  (б) и  $2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. (в).

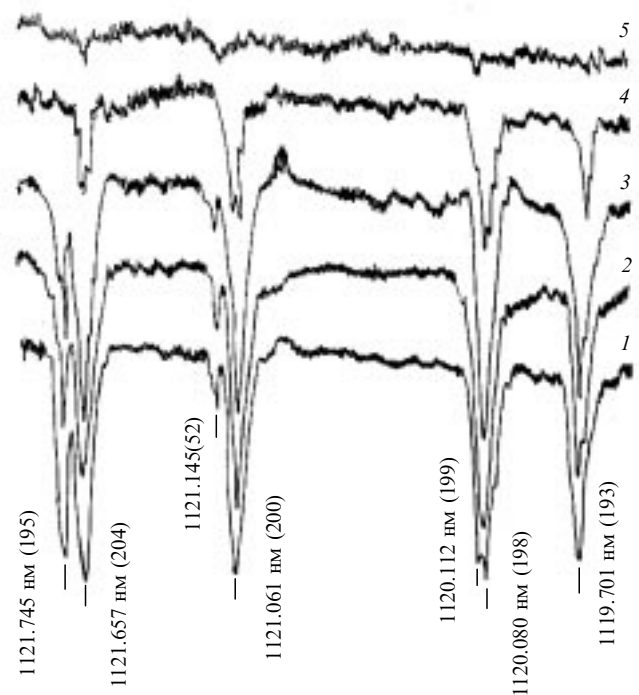


Рис.3. Фрагмент спектра поглощения паров H $_2$ O в атмосферном воздухе (1), а также в бензине А-76 (2), А-92 (3), А-95 (4) и Б-100 (5); в скобках после длин волн указана оптическая сила поглощения.

( $\sim 1 - 5$ )  $\cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. После трех-четырёхкратного отжига трубки лазера содержание O $_2$  уменьшилось примерно на порядок (отжиг производился при непрерывной откачке), а интенсивность генерации лазера возросла на 20–30 %. Такие исследования могут использоваться при контроле состава среды технологических лазеров [10–11] и реализации оптимальных условий их работы.

ВРЛС использовались также для обнаружения примеси воды в коммерческом бензине и бытовом газе. На рис.3 приведены фрагменты спектров поглощения H $_2$ O, зарегистрированных с помощью ВРЛС на основе лазера на NaF: $F_2^+$ : $F_2^-$  [7] в бензине разных марок. Исследовался участок спектра с сильными и примерно равными по эквивалентной ширине линиями поглощения. Пары бензина с примесью воды из пробоотборника объемом  $\sim 10$  см $^3$  при температуре  $\sim 20$  °С испарялись в вакуумированную кювету ВРЛС до давления насыщенных паров. Характер и интенсивность линий поглощения, приведенных на рис. 3, свидетельствуют о том, что 0.5–1.5 % примеси воды содержится во всех исследованных марках бензина (кроме специально очищенного бензина Б-100). Исследование бытового газа показало, что в нем примесь воды не превышает 1.5–2 %.

Тщательное изучение спектров поглощения водяного пара (использовалась дважды перегнанная дистиллированная вода) в диапазоне длин волн 1097.0–1136.0 нм с помощью ВРЛС на  $F_2^+$ -ЦО позволило зафиксировать несоответствие наших результатов данным, приведенным в атласе солнечного спектра [12]. Нам удалось идентифицировать четыре линии водяного пара ( $\lambda = 1130.842, 1131.076, 1131.479$  и  $1131.501$  нм), ранее приписанные в [12] циану и кремнию.

С помощью ВРЛС на Al $_2$ O $_3$ :Ti $^{3+}$  ( $\chi \approx 10^{-7} - 10^{-8}$  см $^{-1}$ ) изучались спектры (полосы) поглощения в твердом теле. Объектами исследования служили клиновидные пластины из стекла, легированного ионами неодима [13].

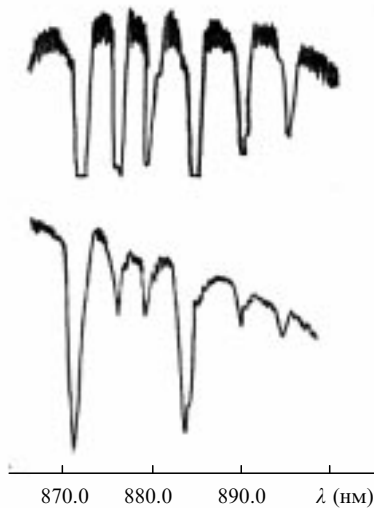


Рис.4. Спектры поглощения ионов неодима в твердотельной матрице при толщине пластины  $d \approx 1$  мм и концентрации ионов неодима  $c \approx 10^{16}$  см $^{-3}$  (а) и при  $d = 10$  мм,  $c \approx 10^{18}$  см $^{-3}$  (б).

Толщина пластин изменялась от 1 до 10 мм, а концентрация неодима от  $10^{16}$  до  $8 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ . Зафиксированные с помощью ВРЛС и спектрофотометра полосы поглощения приведены на рис.4. Видно, что ВРЛС позволяет определять наличие примеси неодима в твердотельных матрицах при ее концентрации  $10^{13} - 10^{14}$  см $^{-3}$ , что значительно превышает чувствительность промышленных спектрофотометров.

С помощью ВРЛС на основе ГСГГ:Cr $^{3+}$  исследовались спектры поглощения ионизированной гетерогенной среды – факела электроразрядной дуги (ток  $J \leq 30$  А) с примесями фуллерена C $_{60}$ , порошок которого набивался в отверстие одного из угольных электродов. Появление в факеле дуги возбужденных частиц фуллерена приводит к значительным изменениям спектров поглощения и эмиссии, схожим с «конденсацией спектра излучения» [14, 15].

На этой же установке и при тех же условиях исследовалась плазма факела дуги, в один из электродов которой добавлялись соли церия Ce(NO $_3$ ) $_3$  или окислы металлического церия. Полученные спектры приведены на рис.5. Характер спектров факела гетерогенной плазмы дуги с добавками C $_{60}$  и Ce(NO $_3$ ) $_3$  позволяет предположить, что на возбужденных переходах фуллерена (или металлоуглеродов) можно реализовать инверсную среду и получить вынужденное излучение. Экспериментальные исследования и поиск возможных условий возникновения вынужденного излучения на возбужденных переходах молекулярных кластеров будет продолжен.

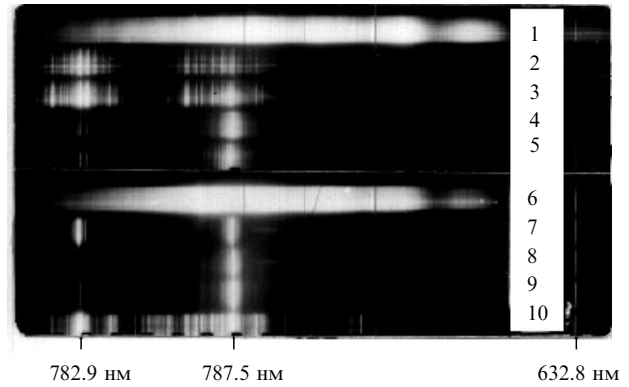


Рис.5. Спектры гетерогенной плазмы факела электрической дуги с добавками фуллерена C $_{60}$  (2–5) и соединения церия (7–10), а также в отсутствие плазмы в резонаторе ВРЛС (1, 6).

Автор выражает благодарность Л.А. Чернозатонскому за предоставленную пробу фуллерена C $_{60}$  и полезные дискуссии.

1. Пахомычева А.А., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **12**, 60 (1970).
2. Жариков Е.В. Колеров А.Н., Лаптев В.В. и др. *ДАН СССР*, **285**, 92 (1985).
3. Колеров А.Н. *ЖПС*, **45**, 135 (1986).
4. Колеров А.Н. *ЖПС*, **44**, 363 (1986).
5. Дубинский М.А., Колеров А.Н., Митягин М.В. и др. *Квантовая электроника*, **13**, 2543 (1986).
6. Врацкий В.А., Колеров А.Н., Кузьмина Е.Е. *Квантовая электроника*, **10**, 1464 (1983).
7. Врацкий В.А., Колеров А.Н. *Квантовая электроника*, **12**, 1089 (1985).
8. Севастьянов Б.К., Федоров Е.А., Колеров А.Н. и др. *ДАН СССР*, **282**, 1357 (1985).
9. Колеров А.Н., Грачев Н.М., Епихина Г.Е. *Изв. АН СССР. Сер. физическая*, **54**, 1531 (1990).
10. Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **23**, 583 (1996).
11. Карелин А.В. *Квантовая электроника*, **25**, 619 (1998).
12. Swenson J.W. et al. *The solar spectrum from 7498 nm to 112016 nm* (Liege, 1970).
13. Колеров А.Н. *Оптика и спектроскопия*, **62**, 709 (1987).
14. Колеров А.Н. *Квантовая электроника*, **15**, 512 (1988).
15. Колеров А.Н. *Письма в ЖТФ*, **13**, 227 (1987).
16. Дроздова О.Н., Колеров А.Н., Коляго С.С. и др. В сб. *Методы исследования спектральных и релаксационных характеристик атомов и ионов* (М., изд-е ВНИИФТРИ, 1990, с.113).
17. Врацкий В.А., Колеров А.Н. *ЖПС*, **41**, 561 (1984).

#### A.N.KoleroV. Miniature intracavity laser spectrum analysers

The basic parameters of miniature intracavity laser spectrum analysers are reported and the spectra of some substances detected with their help are demonstrated.