

**25-й ОБЩЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР  
ПО ДИОДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ  
им. А.М.Прохорова  
(ДЛС-25)**

**Москва, 10 апреля 2019 г.**

**Отдел ДЛС Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Научный центр волоконной оптики РАН,  
Институт спектроскопии РАН,  
Научный совет РАН по проблеме «Спектроскопия атомов и молекул»  
Научный совет по аналитической химии РАН**

проводят

***25-й ОБЩЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО ДИОДНОЙ  
ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ им. А.М. Прохорова (ДЛС-25)***

Тематика семинара:

1. Перестраиваемые полупроводниковые лазеры и элементы волоконной оптики.
2. Фундаментальная атомная и молекулярная спектроскопия.
3. Новые техника и методики измерений.
4. Проблемы диагностики и мониторинга окружающей среды и технологических процессов. Приборы и техника.
5. Аналитические системы и промышленные применения.

Руководитель семинара: проф. А.И. Надеждинский.

Состав оргкомитета:

Сопредседатели:

А. И. Надеждинский – ИОФАН

Члены оргкомитета:

Ю.Н. Пономарев – ИОА СО РАН

С.Н. Цхай - ФИАН

М.А. Большов – ИСАН

М.И. Беловолов – НЦВО РАН

С.М. Першин – ИОФАН

М.В. Спиридонов - ИОФАН

Секретарь семинара:

Я. Я. Понуровский – ИОФАН

Заседание семинара состоится в среду **10-го апреля 2019 г.** в 11:00 в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу: Москва, Вавилова ул. 38 (корп. 5, этаж 4-й Отдел ДЛС ИОФ РАН (к. 409). Вход через проходную на Ленинском пр. 53, по предъявлению паспорта.

Рабочий язык семинара - русский

Заявки на участие в семинарах в качестве докладчиков просьба подавать по электронным адресам [ponur1960@yandex.ru](mailto:ponur1960@yandex.ru)

Контактный адрес: Москва, 119991, Вавилова 38, ИОФАН,

Телефоны: Я.Я. Понуровский (8-499-503-82-64)

Вебсайт: [www.dls.gpi.ru](http://www.dls.gpi.ru)

## Программа семинара

### 10.50–11.00 Регистрация

- 11.00–11.30 **В.В. Лигер**, В.Р. Мироненко, Ю.А. Курицын, М.А. Большов  
*Институт спектроскопии РАН, Россия, 142190 Москва, г. Троицк, [liger@isan.troitsk.ru](mailto:liger@isan.troitsk.ru)*  
Определение максимальной температуры в пространственно неоднородной горячей зоне методом абсорбционной спектроскопии с одним перестраиваемым диодным лазером
- 11.30–12.00 Ю.П. Яковлев<sup>1</sup>, А.М. Монахов<sup>1</sup>, Е.В. Куницына Е.А<sup>1</sup>, Гребенщикова<sup>1</sup> и А.Н. Баранов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия.*  
<sup>2</sup>*Institut d'Electronique du Sud (IES), Universite Montpellier 2, 34095 Montpellier, France тел: (812) 292-79-56, [yakovle.iropto@mail.ioffe.ru](mailto:yakovle.iropto@mail.ioffe.ru)*  
Перестраиваемые по частоте WGM-лазеры в средней ИК-области спектра (2-2.4 мкм), работающие на модах шепчущей галереи
- 12.00–12.10 **Перерыв**
- 12.10–12.40 И.И. Виноградов и группа разработчиков М-ДЛС  
*ИКИ РАН, Профсоюзная 84/32 117997 Москва, Россия [imant@iki.rssi.ru](mailto:imant@iki.rssi.ru)*  
Эксперимент М-ДЛС на стационарной посадочной платформе проекта «ЭкзоМарс-2020»
- 12.40–13.10 В.П. Дураев, С.В. Медведев, С.А. Воронченко  
*АО "НОЛАТЕХ" (Акционерное общество "Новая Лазерная Техника") Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д.3. [nolatech@mail.ru](mailto:nolatech@mail.ru)*  
Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры на длину волны 1650 нм

**DLS Department of A.M. Prokhorov General Physics Institute, RAS  
P.N. Lebedev Physical Institute, RAS  
Fiber Optics Research Center, RAS  
Institute of Spectroscopy, RAS  
RAS Science Council on Atomic and Molecular Spectroscopy  
RAS Science Council on Analytical Chemistry**

**Moscow, 10 April 2019**

***The 25<sup>th</sup> A.M. Prokhorov ALL-RUSSIAN SEMINAR ON  
TUNABLE DIODE LASER SPECTROSCOPY (TDLS-25)***

Seminar topics:

6. Tunable diode lasers and fiber optics elements.
7. Basic atomic and molecular spectroscopy.
8. Novel techniques and methodology of measurements.
9. Problems of diagnostics and monitoring of environment and technological processes. Instruments and techniques.
10. Analytic systems and industrial applications.

Seminar chairman: Prof. A. I. Nadezhdinskii<sup>1</sup>

Advisory Committee:

Co-Chairs: Prof. A. I. Nadezhdinskii (GPI RAS)  
Prof. A. W. Mantz (Connecticut College, USA)

Members: Yu. N. Ponomarev (Institute of Atmospheric Optics SB RAS)  
S. Yu. Savinov (Lebedev Physical Institute)  
S. T. Tskhai (Lebedev Physical Institute)  
M. A. Bolshov (IS RAS)  
M. I. Belovolov (Fiber Optics Research Center RAS)  
S. M. Pershin (GPI RAS)  
M. V. Spiridonov (GPI RAS)

Secretary: Ya. Ya. Ponurovskii<sup>\*\*</sup> (GPI RAS)

Time: Wednesday 10 April 2019 from 11:00 to 14:00

Place: Moscow, Vavilov str. 38, A.M. Prokhorov General Physics  
Institute, RAS, building 5, floor 4

The Seminar working language: Russian, English

---

<sup>1</sup>[nadezhdinskii@gmail.com](mailto:nadezhdinskii@gmail.com),  
<sup>\*\*</sup>[ponur1960@yandex.ru](mailto:ponur1960@yandex.ru)

## Seminar agenda

### 10.50–11.00 Registration

- 11.00–11.30 V.V. Liger, V.R. Mironenko, Yu.A. Kuritsyn, M.A. Bolshov  
*Institute for Spectroscopy RAS, Moscow, Russia. 108840 Troitsk, Moscow, Russia*  
[liger@isan.troitsk.ru](mailto:liger@isan.troitsk.ru)  
Determination of the Maximum Temperature in a Non-Uniform Hot Zone by Line-Of-Site Absorption Spectroscopy with a Single Diode Laser
- 11.30–12.00 Yu.P. Yakovlev<sup>1</sup>, A.M. Monahov<sup>1</sup>, E.V. Kunitsyna<sup>1</sup>, E.A. Grebenchikova<sup>1</sup> and A.N. Baranov<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*The Ioffe Physical-Technical Institute RAS. 26 Politekhnicheskaya, St Petersburg 194021, Russian Federation*  
<sup>2</sup>*Institut d'Electronique du Sud (IES), Universite Montpellier 2, 34095 Montpellier, France*  
тел: (812) 292-79-56, , эл. почта:  
[yakovle.iropto@mail.ioffe.ru](mailto:yakovle.iropto@mail.ioffe.ru)  
Frequency tunable WGM-lasers in the mid-IR region of the spectrum (2-2.4  $\mu\text{m}$ ), working on whispering gallery mods
- 12.00–12.10 break**
- 12.10–12.40 I. Vinogradov and the M-DLS team  
*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS), 117997, 84/32 Profsoyuznaya Str., Moscow, Russia*  
[imant@iki.rssi.ru](mailto:imant@iki.rssi.ru)  
M-DLS experiment for stationery landing platform of the "ExoMars-2020" mission
- 12.40–13.10 V.P. Duraev, S.V. Medvedev, S.A. Voronchenko  
*Joint-stock company "NOLATECH" (New Laser technology), Russia, 117342, Moscow, Vvedenskogo st., 3.*  
Tunable single-frequency semiconductor lasers at a wavelength of 1650 nm.

## Оглавление

1. *В.В. Лигер, В.Р. Мироненко, Ю.А. Курицын, М.А. Большов.* Определение максимальной температуры в пространственно неоднородной горячей зоне методом абсорбционной спектроскопии с одним перестраиваемым диодным лазером 7
2. *Ю.П. Яковлев, А.М. Монахов, Е.В. Куницына Е.А, Гребенищикова и А.Н. Баранов,* Перестраиваемые по частоте WGM- лазеры в средней ИК- области спектра (2-2.4 мкм), работающие на модах шепчущей галереи 9
3. *И.И. Виноградов и группа разработчиков М-ДЛС,* Эксперимент М-ДЛС на стационарной посадочной платформе проекта «ЭкзоМарс-2020» 11
4. *В.П. Дураев, С.В. Медведев, С.А. Воронченко,* Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры на длину волны 1650 нм 12

Доклады, представленные на 24-м Семинаре по диодной лазерной спектроскопии им. А.М. Прохорова (Москва, 27-го апреля 2016г.)

5. *В.П. Дураев, С.В. Медведев,* Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры 14
6. *Д.А. Яранцев,* Эксперименты по воспламенению углеводородного топлива с помощью плазмы в сверхзвуковом потоке воздуха – проблемы диагностики 22
7. *Ю.А. Адаменков,* Измерение коэффициента усиления и температуры активной среды 33
8. *М.В. Спиридонов, А.Ю.Климчук, В.М. Семенов, И.М. Михайлов, А.В. Родин,* Концепт диодно-лазерного спектрометра для одновременного измерения парниковых газов в столбе и в локальной точке 36

## **Определение максимальной температуры в пространственно неоднородной горячей зоне методом абсорбционной спектроскопии с одним перестраиваемым диодным лазером**

***В.В. Лизер, В.Р. Мироненко, Ю.А. Курицын, М.А. Большой***

*Институт спектроскопии РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия*

Предложен новый алгоритм определения максимальной температуры в пространственно неоднородной горячей зоне методом абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами. В предыдущих работах температура исследуемого объекта определялась в процессе подгонки экспериментального спектра поглощения теоретическим, симулированным на основании спектроскопических баз с одной температурой. Для неоднородной зоны такой подход, очевидно, дает некоторое усредненное по трассе зондирования значение температуры. Новый алгоритм основан на подгонке экспериментального спектра линейной комбинацией однотемпературных теоретических спектров с весовыми коэффициентами, являющимися параметрами подгонки. Предложенный алгоритм проверен в числовом эксперименте и в лабораторном эксперименте с горячей зоной в виде двух независимых кювет, расположенных на трассе зондирования. Параметры среды в каждой кювете могли независимо устанавливаться и поддерживаться. Температуру в каждой кювете измеряли параллельно термопарами. Подгонка проводилась корреляционным методом. В первых экспериментах было обнаружено значительное различие в экспериментальных спектрах и спектрах, симулированных на основе баз HITRAN и HITEMP. Поэтому была создана своя база однотемпературных экспериментальных спектров в диапазоне 300 – 1200 К с шагом 50 К. В дальнейшем, экспериментальные спектры, зарегистрированные при зондировании трассы с двумя кюветами, подгонялись суммой таких однотемпературных спектров. Использование разработанного алгоритма позволило оценить максимальную температуру на трассе с точностью  $\leq 30$  К. Отметим, что предложенный алгоритм позволяет оценить именно максимальную температуру неоднородной зоны, а не ее пространственное распределение.

# **Determination of the Maximum Temperature in a Non-Uniform Hot Zone by Line-Of-Site Absorption Spectroscopy with a Single Diode Laser**

*V.V. Liger, V.R. Mironenko, Yu.A. Kuritsyn, M.A. Bolshov*

*Institute of Spectroscopy RAS, 108840 Troitsk, Moscow, Russia*

A new algorithm for the estimation of the maximum temperature in a non-uniform hot zone by a sensor based on absorption spectrometry with a diode laser is developed. The algorithm is based on the fitting of the absorption spectrum of a test molecule in a non-uniform zone by linear combination of two single temperature spectra simulated using spectroscopic databases. The proposed algorithm allows one to better estimate the maximum temperature of a non-uniform zone and can be useful if only the maximum temperature rather than a precise temperature profile is of primary interest. The efficiency and specificity of the algorithm are demonstrated in numerical experiments and experimentally proven using an optical cell with two sections. Temperatures and water vapor concentrations could be independently regulated in both sections. The best fitting was found using a correlation technique. A distributed feedback (DFB) diode laser in the spectral range around 1.343  $\mu\text{m}$  was used in the experiments. Because of the significant differences of the temperature dependences of the experimental and theoretical absorption spectra in the temperature range 300-1200 K, a database was constructed using experimentally detected single temperature spectra. Using the developed algorithm the maximum temperature in the two-section cell was estimated with accuracy better than 30 K.

## Перестраиваемые по частоте WGM- лазеры в средней ИК-области спектра (2-2.4 мкм), работающие на модах шепчущей галереи

Ю.П.Яковлев<sup>1</sup>, А.М.Монахов<sup>1</sup>, Е.В.Куницына Е.А.Гребенщикова<sup>1</sup> и А.Н.Баранов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе, ул.Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия.

<sup>2</sup>Institut d'Electronique du Sud (IES), Universite Montpellier 2, 34095 Montpellier, France  
тел.: (812) 292-79-56, , эл. почта: [yakovle.iropto@mail.ioffe.ru](mailto:yakovle.iropto@mail.ioffe.ru)

Моды шепчущей галереи (WGM) являются универсальными линейными возбуждениями дисковых и кольцевых резонаторов. Впервые они наблюдались в 1910 году как звуковые волны, распространяющейся вдоль наружной стены галереи для посетителей, в круглом зале собора Св. Павла в Лондоне и были исследованы лордом Релеем [1]. Придуманное для этого акустического явления название "моды шепчущей галереи" - whispering gallery modes (WGM) было использовано для обозначения собственных мод дисковых резонаторов. Мы использовали это явление для создания нового типа WGM-лазера в средней ИК-области спектра [2,3].

Нами были созданы и исследованы дисковые лазеры на основе квантово-размерной гетероструктуры, содержащей две квантовые ямы GaInAsSb/AlGaAsSb шириной 100 Å для спектрального диапазона 2,0-2,4 мкм, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре (рис.1).

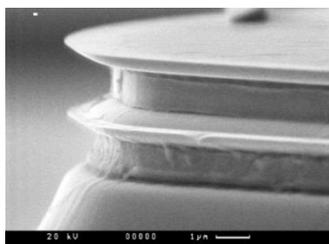


Рис.1. Форма WGM-лазера

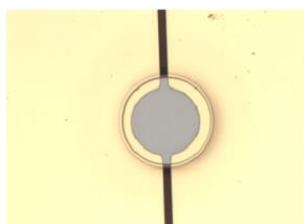


Рис.2. Вид верхнего контакта

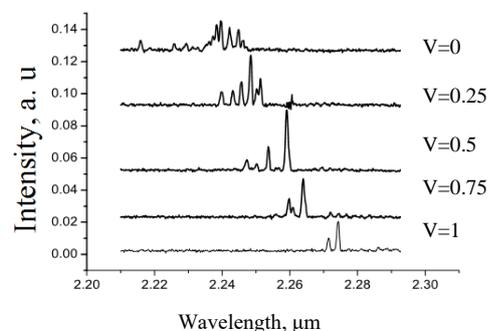


Рис.3.Спектры WGM-лазера

В докладе будут рассмотрены электролюминесцентные свойства WGM-лазера как с целым (диск) так и с усеченными резонаторами (полдиска и четверть диска). Кроме того будут представлены результаты исследования перестраиваемого по частоте WGM-лазера с управляемым поглотителем. Для этой цели верхний контакт дискового лазера состоял из двух секторов при этом сектора были отделены зазором шириной 10 мкм (рис.2). Одна часть контакта дискового лазера находилась под напряжением выше порога генерации, а вторая часть контакта ниже порога генерации, которая изменялась от 0 до 1 В. При этом наблюдалась сверхбольшая перестройка по частоте лазера от 2.24 мкм до 2.275 мкм

(рис.3). В докладе будет рассмотрен механизм такой уникальной перестройки. Такой диапазон перестройки дискового лазера соизмерим с полушириной спектра спонтанного излучения и перспективен для применения WGM-лазеров в диодно-лазерных спектрометрах.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 18-52-00027.

### *Литература.*

- [1] Lord Rayleigh, *Phyl. Mag.* 20, 1001, 1910
- [2] Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Hill G. *Elect. Lett.* 2003. **39**, 916.
- [3] Monakhov A.M., Sherstnev V.V., Astakhova A.P., Yakovlev Yu.P., Boissier G., Teissier R., Baranov A.N. *Appl. Phys. Lett.* 2009, **94**, 051102.

## **Frequency tunable WGM-lasers in the mid-IR region of the spectrum (2-2.4 $\mu\text{m}$ ), working on whispering gallery mods**

***Yu.P. Yakovlev<sup>1</sup>, A.M. Monakhov<sup>1</sup>, E.V. Kunitsyna<sup>1</sup>, E.A. Grebenchikova<sup>1</sup> and A.N. Baranov<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>*The Ioffe Physical-Technical Institute RAS. 26 Politekhnicheskaya, St Petersburg 194021, Russian Federation.*

<sup>2</sup>*Institut d'Electronique du Sud (IES), Universite Montpellier 2, 34095 Montpellier, France  
тел: (812) 292-79-56, , эл. почта: [yakovle.iropto@mail.ioffe.ru](mailto:yakovle.iropto@mail.ioffe.ru)*

Whisper gallery modes (WGM) are universal linear excitations of disk and ring resonators. For the first time they were observed in 1910 as sound waves propagating along the outer wall of the gallery for visitors, in the round hall of the Cathedral of St. Paul in London and were investigated by Lord Rayleigh [1]. We have created and studied disk lasers based on a quantum-dimensional heterostructure containing two *GaInAsSb/AlGaAsSb* quantum wells 100 Å wide for the spectral range 2.0-2.4  $\mu\text{m}$  operating in a continuous regime at room temperature (Fig.1). The report will consider the electroluminescent properties of a WGM-laser with both whole (disk) and truncated resonators (half-disk and quarter-disk). In addition, the results of a frequency-tunable WGM-laser with a controlled absorber will be presented. The report will consider the mechanism of unique laser frequency tuning from 2.24  $\mu\text{m}$  to 2.275  $\mu\text{m}$ . Such a range of frequency tuning for disk lasers is comparable to the halfwidth of the spontaneous radiation spectrum and promising for the application of WGM-lasers in the diode-laser spectrometers.

## **Эксперимент М-ДЛС на стационарной посадочной платформе проекта «ЭкзоМарс-2020»**

***И.И. Виноградов и группа разработчиков М-ДЛС***

*Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 117997, ул. Профсоюзная 84/32, Москва ( [imant@iki.rssi.ru](mailto:imant@iki.rssi.ru) )*

Эксперимент М-ДЛС (Марсианский многоканальный диодно-лазерный спектрометр) был предложен для изучения Марсианской атмосферы вблизи поверхности нашей соседней планеты. Спектрометр М-ДЛС представляет собой перестраиваемый диодно-лазерный абсорбционный спектрометр (TDLAS), дополненный методикой спектроскопии полного внутрирезонаторного выхода (ICOS). Выполнена разработка компактного и лёгкого прибора М-ДЛС, размещаемого на борту стационарной посадочной платформы проекта «ЭкзоМарс-2020» и предназначенного для продолжительных in-situ исследований химических и изотопных вариаций приповерхностной атмосферы Марса. Производство аппаратуры М-ДЛС в настоящее время выполняется в рамках международного проекта «ЭкзоМарс-2020».

### **M-DLS experiment for stationery landing platform of the “ExoMars-2020” mission**

***I. Vinogradov and the M-DLS team***

*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS), 117997, 84/32 Profsoyuznaya Str., Moscow, Russia [imant@iki.rssi.ru](mailto:imant@iki.rssi.ru)*

The M-DLS (Martian Multichannel Diode Laser Spectrometer) experiment was proposed to study Martian atmosphere near the surface of our neighbor planet. The M-DLS spectrometer employs tunable diode laser absorption spectrometer (TDLAS), enhanced by integrated cavity output spectroscopy (ICOS) technique. M-DLS has been completely designed as a compact and lightweight instrument, to be located onboard the ExoMars-2020 stationary landing platform and aimed at continuous in-situ study of chemical and isotopic composition variations of the near-surface Martian atmosphere. Industrial realization of the M-DLS instrument is now under way within the frames of the “ExoMars-2020” international mission.

## **Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры на длину волны 1650 нм.**

**В.П. Дураев, С.В. Медведев, С.А. Воронченко**

*АО "НОЛАТЕХ" (Акционерное общество "Новая Лазерная Техника") Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д.3. [nolatech@mail.ru](mailto:nolatech@mail.ru)*

Представлены результаты работ по созданию лазерного источника на длину волны 1650 нм, которая совпадает с линией поглощения метана. Для стабилизации длины волны применялась волоконно-брэгговская, которая служила выходным зеркалом внешнего резонатора. Использовался лазерный диод, обеспечивающий выходную мощность более 100 мВт. Температурное расширение или механическое напряжение позволяет перестраивать длину волны лазера в пределах 1 нм.

## **Tunable single-frequency semiconductor lasers at a wavelength of 1650 nm.**

**V.P. Duraev, S.V. Medvedev, S.A. Voronchenko**

*Joint-stock company "NOLATECH" (New Laser technology), Russia, 117342, Moscow, Vvedenskogo st., 3.*

We present the results of work to develop laser source in the 1650 nm region, the latter coinciding with an absorption line of methane. Fiber Bragg grating have been used to stabilize the output of external cavity laser, using semiconductor gain chip, to give laser output at 1648 nm. Thermal expansion or mechanical strain of the Bragg grating offers a suitable wavelength tuning mechanism. Results are presented including the wavelength tuning range, output power, side-mode suppression and linewidth of devices for application in high resolution gas spectroscopy.

**Доклады, представленные на 23-м Семинаре по диодной лазерной спектроскопии им. А.М. Прохорова (Москва, 27 октября 2015 г.)**

Тексты докладов можно найти на сайте  
[www.dls.gpi.ru](http://www.dls.gpi.ru)

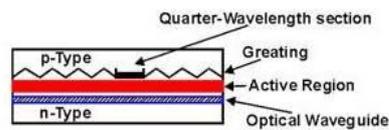
# ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ОДНОЧАСТОТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В.П. Дураев, С.В. Медведев

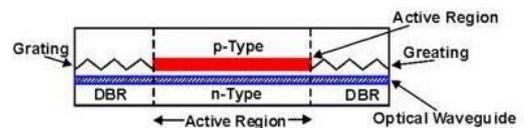
ЗАО «НОЛАТЕХ»

## Одночастотные лазеры

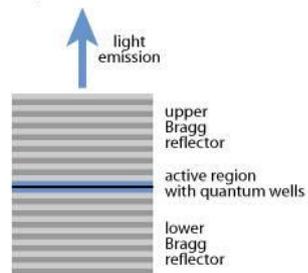
### 1) DFB



### 2) DBR

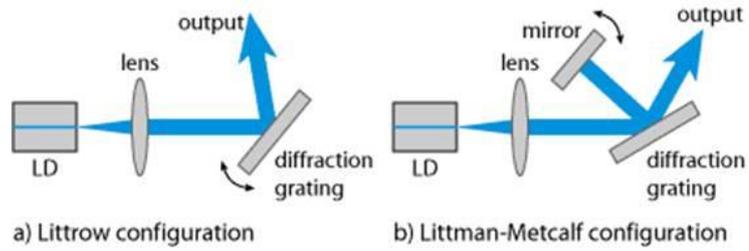


### 3) VCSEL

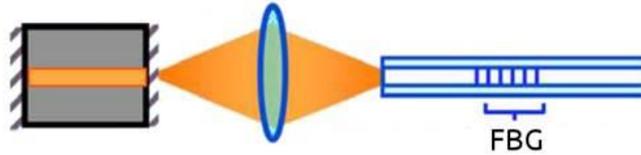


# Лазеры с внешним резонатором

## 1) Схема Литтроу или Литтмана

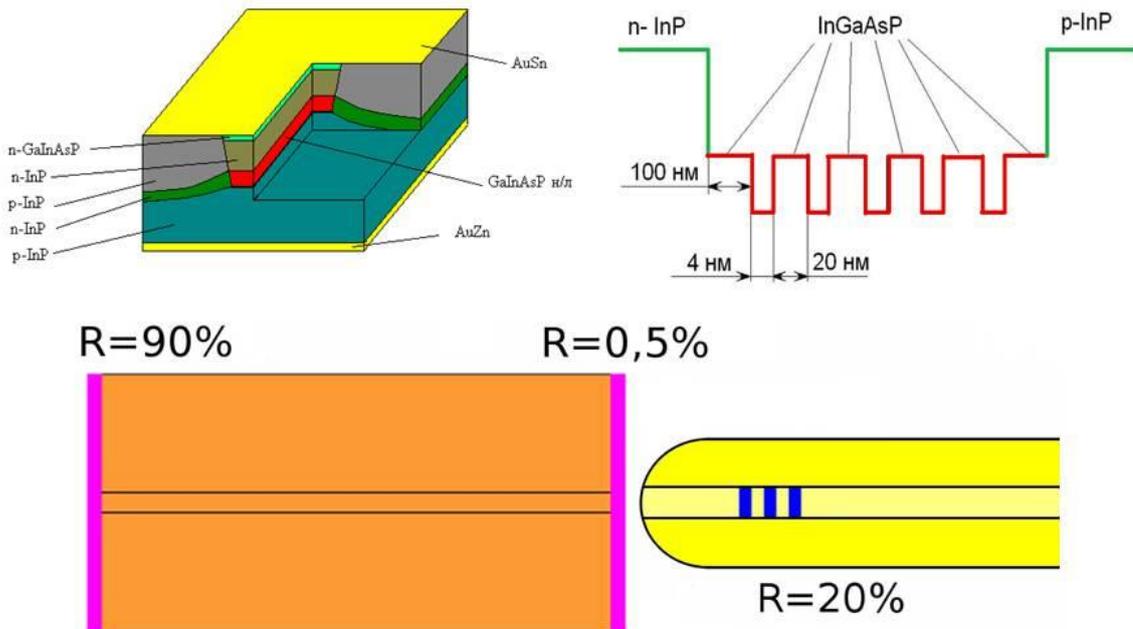


## 2) Резонатор на основе ВБР



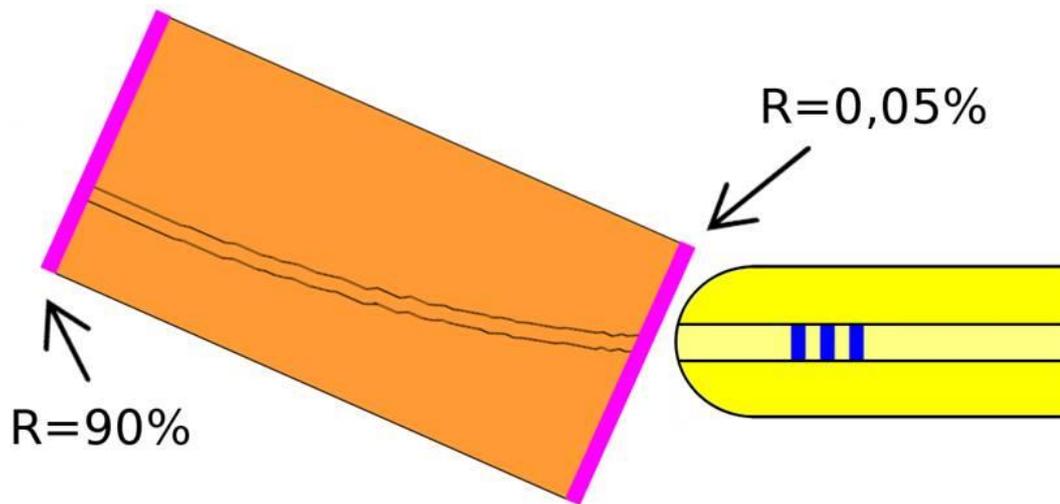
▶ 3

# Конструкция активного элемента лазера



▶ 4

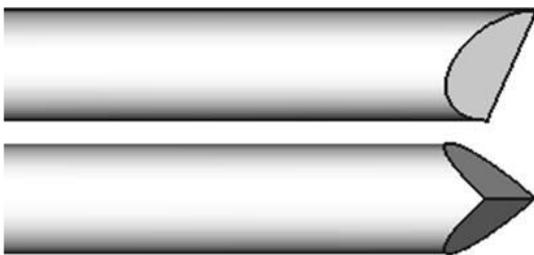
## Одночастотный лазер на основе двухпроходного усилителя



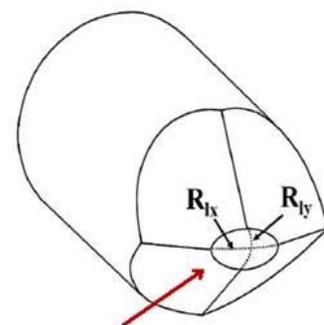
▶ 5

## Волоконные микролинзы

а) цилиндрические



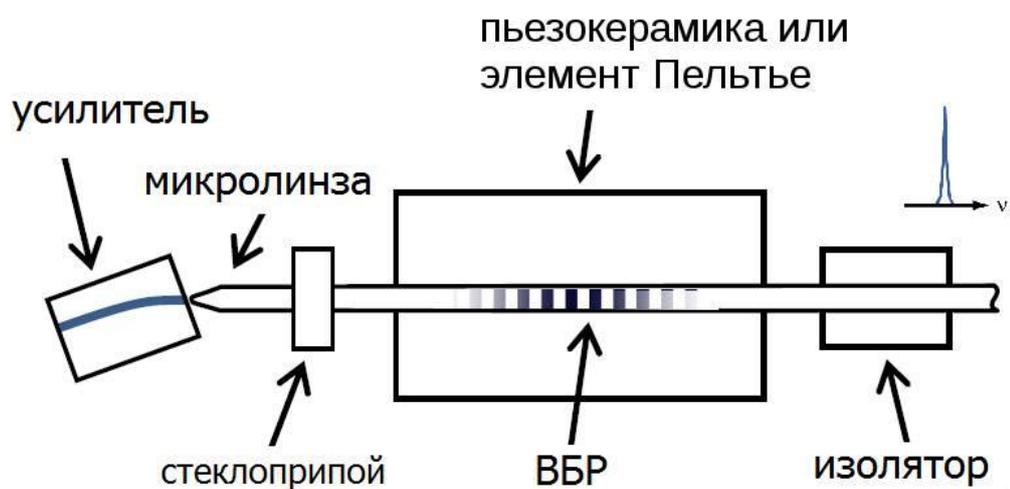
б) пирамидальные



просветляющее  
покрытие  
 $R < 0,1\%$

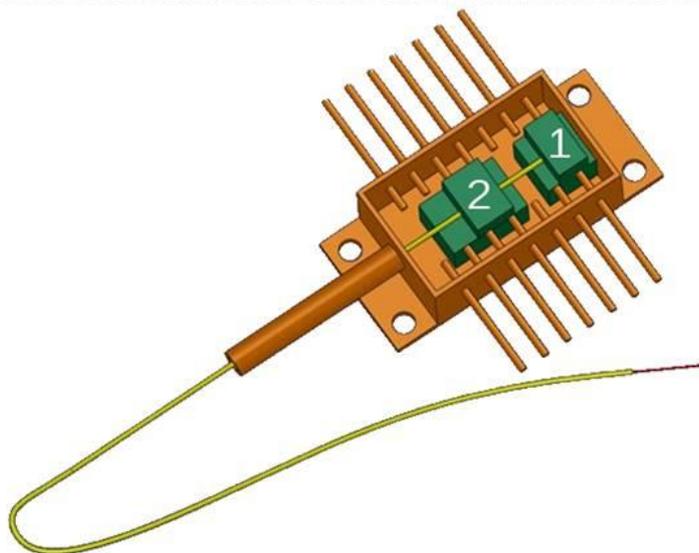
▶ 6

## Принципиальная схема перестраиваемого лазера



▶ 7

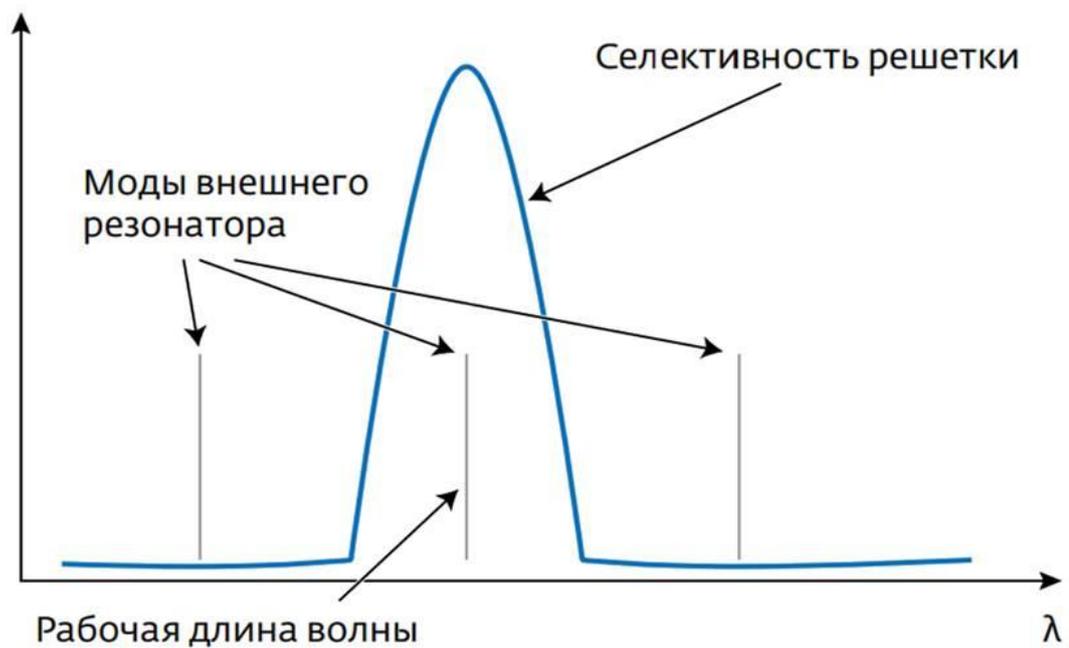
## Перестраиваемый лазер в корпусе butterfly



- 1 – активный элемент
- 2 – пьезокерамика или элемент Пельтье

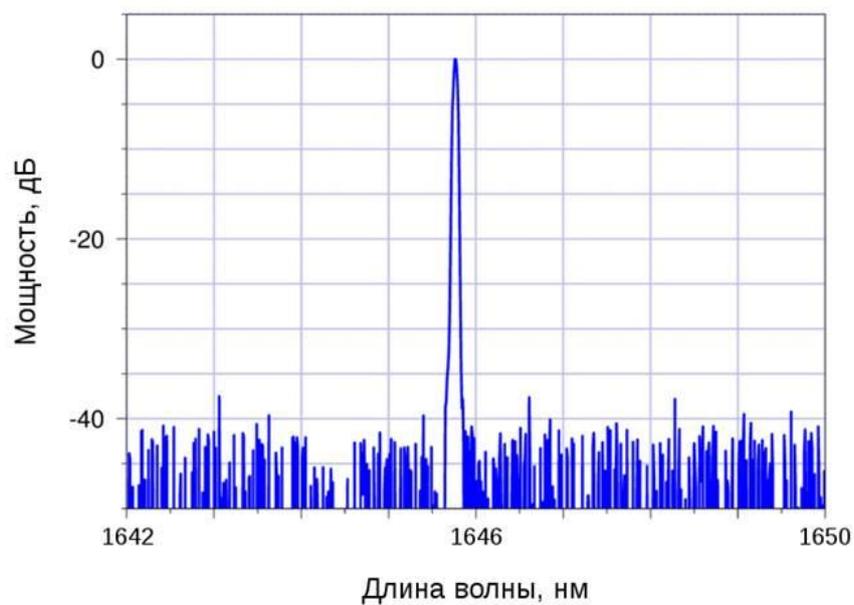
▶ 8

## Модовый состав лазера с внешним резонатором



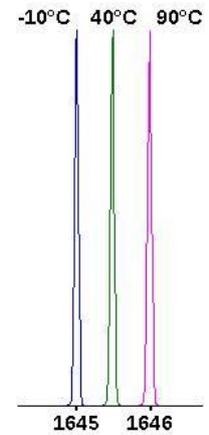
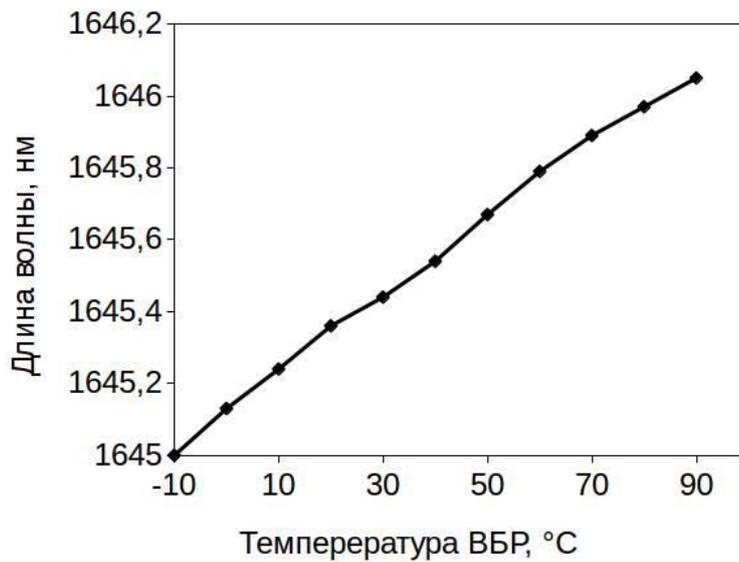
▶ 9

## Спектр лазера



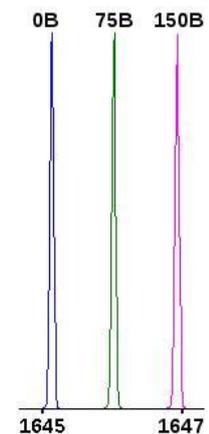
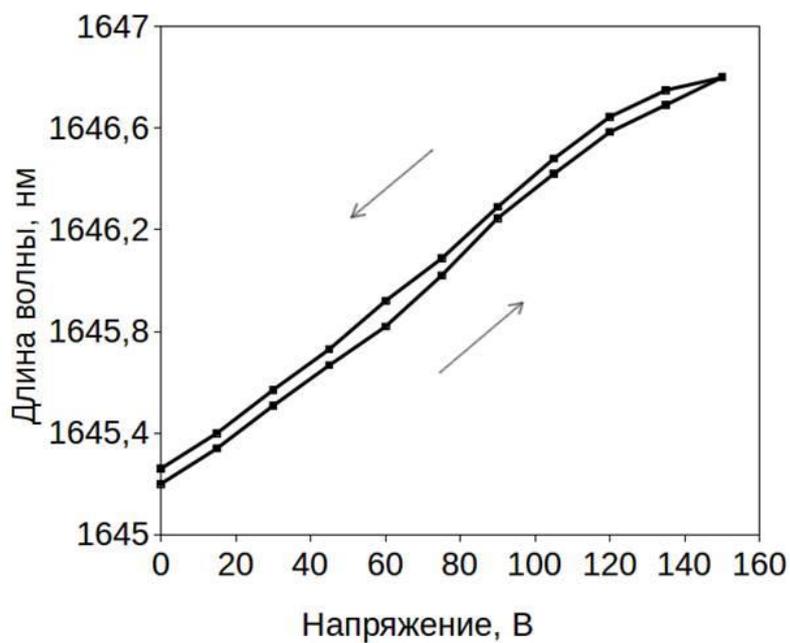
▶ 10

## Температурная перестройка длины волны с помощью элемента Пельтье



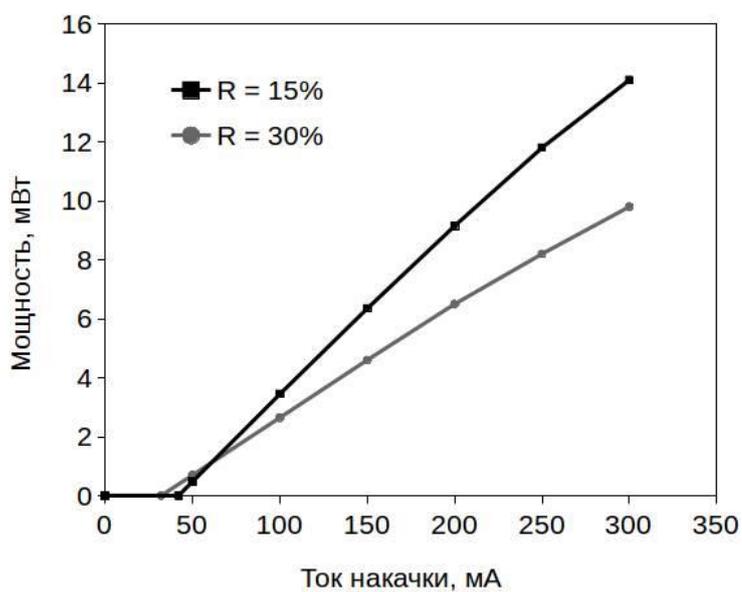
▶ 11

## Механическая перестройка длины волны с помощью пьезокерамики



▶ 12

## Ватт-амперные характеристики



▶ 13

## Перестраиваемые одночастотные лазеры

Длина волны, нм	Мощность, мВт	Подавление боковой моды, дБ	Ширина линии, кГц	Перестройка, нм
700 - 790	10	10 - 20	50 - 300	1 - 2
800 - 850	10	10 - 20	50 - 300	1 - 2
900 - 980	20	20 - 30	50 - 300	1 - 2
1020 - 1090	20	20 - 30	50 - 300	1 - 2
1270 - 1330	20	30 - 40	50 - 300	1 - 2
1510 - 1570	20	35 - 45	50 - 300	1 - 2
1620 - 1660	10	35 - 45	50 - 300	1 - 2

▶ 14

## Выводы

---

- Представлены результаты создания и исследования перестраиваемых одночастотных полупроводниковых лазеров на основе волоконно-брэгговских решеток
- Диапазон плавной перестройки длины волны составляет до 2 нм
- Ширина линии излучения 50 – 300 кГц
- Подавление боковой моды более 40 дБ
- Мощность излучения до 20 мВт

БЛАГОДАРИЮ ЗА ВНИМАНИЕ

---



**24-й ОБЩЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО ДИОДНОЙ  
ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ им. А.М. Прохорова (ДЛС-24)  
27 апреля 2016 г.**

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВОСПЛАМЕНЕНИЮ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА  
С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА –  
ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ**

**Д.А. Яранцев**

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

**Мотивация работы: Проблемы ГПВРД**



- Потери полного давления в камере сгорания при использовании механических стабилизаторов пламени.
- Смешение топлива и окислителя.
- Воспламенение и стабилизация горения.
- Увеличение диапазона рабочих параметров – регулирование воздухозаборника и камеры сгорания.

## Плазменное стимулирование горения

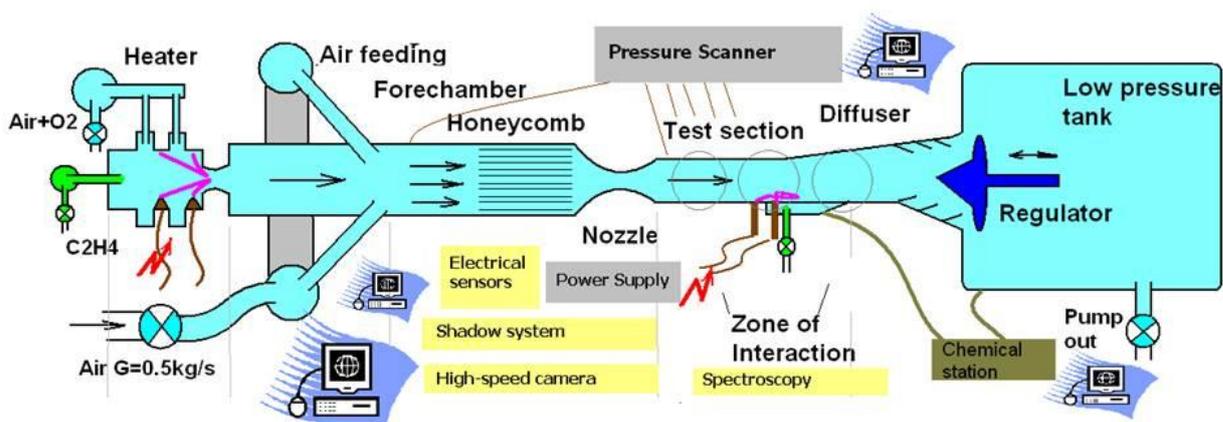
Область параметров:  $P=0.2-2$  атм;  $T=0.2-2$  кК;  $V>500$  м/с

Метод генерации плазмы – поверхностный электродный разряд.

Основные механизмы воздействия:

- Быстрый локальный нагрев газа
- Нарботка активных частиц
- Генерация ударных волн
- Турбулизация потока воздуха

### Схема импульсной аэродинамической трубы ИАДТ-50 ОИВТ РАН



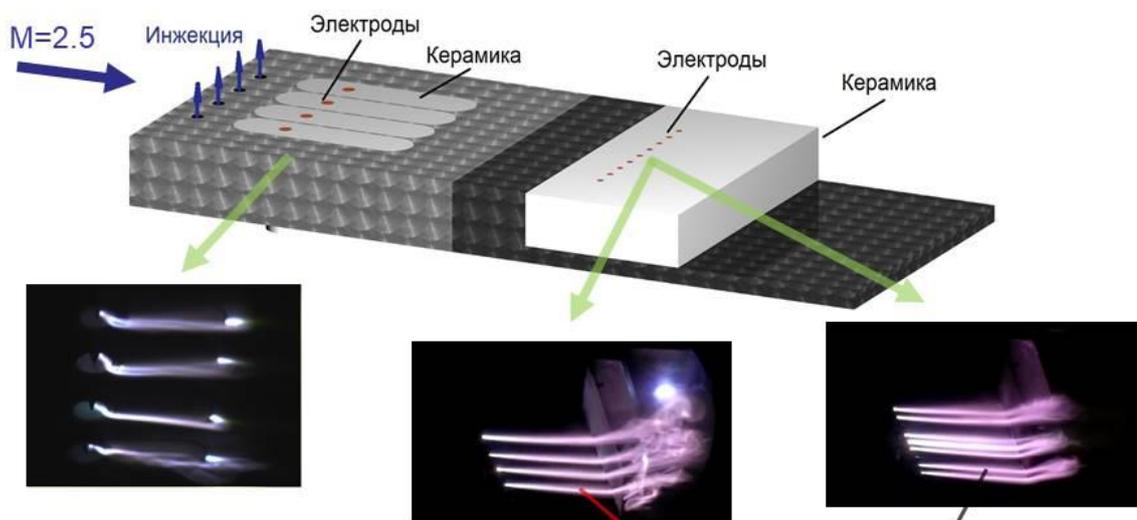
Длительность стационарного аэродинамического режима  $\sim 0.5$  с

Сечение  $72 \times 72$  мм;  $M=2$  or  $2.5$ ;  $P_{st} = 140-180$  Торр;  $m_{air} = 0.5-0.9$  кг/с,  $m_{fuel} = 0.05-2$  г/с для  $H_2$ ;  $m_{fuel} = 1-6$  г/с для  $C_2H_4$

## Средства диагностики

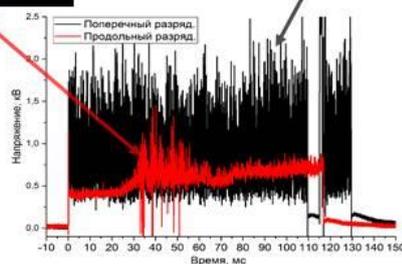
- ✓ Распределение давления, 16 точек, 2.5мс
- ✓ Шлирен, 100нс; 0.2мм; 500-2000к/с
- ✓ Видео, до 75 кГц (камера линейного сканирования)
- ✓ Лазерная абсорбционная спектроскопия (H<sub>2</sub>O)
- ✓ Оптическая эмиссионная спектроскопия (250-1000 нм)
- ✓ Измерения тока/напряжения
- ✓ ИК камера, WL = 7-12мкм
- ✓ Химическая станция, O<sub>2</sub>, NO, CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>

## Схемы генерации электрического разряда в сверхзвуковом потоке воздуха

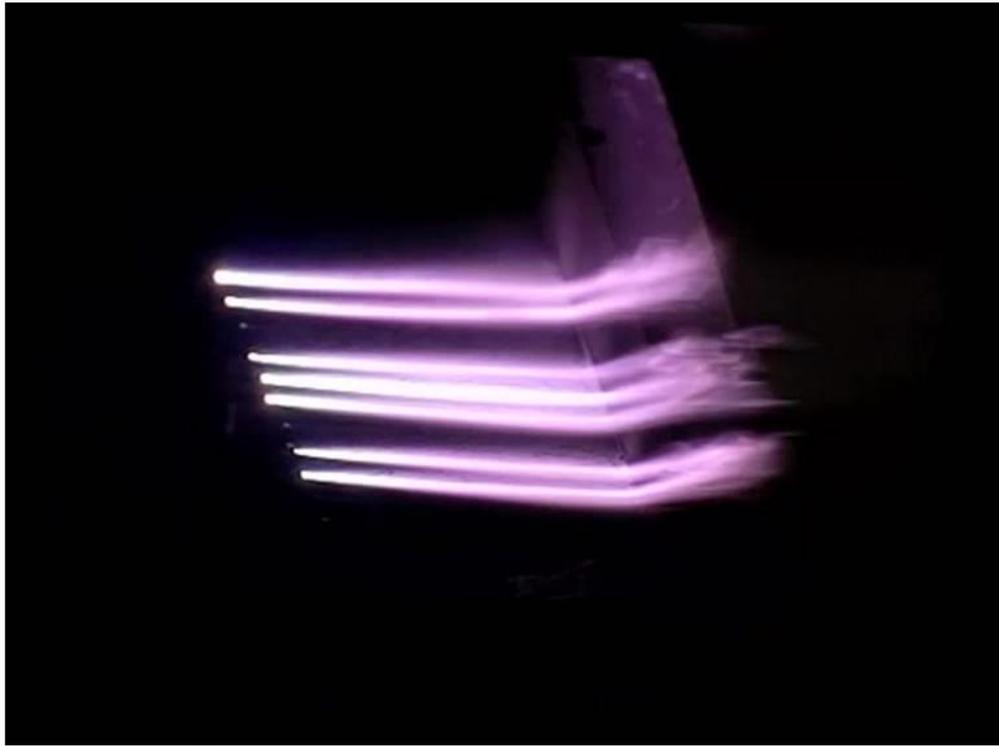


### Параметры разряда:

$U_s = 5$  кВ,  $U_{dis} = 0.5-1$  кВ  
 $I_{dis} = 5-18$  А,  $W_{dis} = 8-15$  кВт,  
 $R_a = 0.56$ ,  $1$  кОм,  $R_k = 0-200$  Ом.  
 $\Delta t = 600$  мс;  $10 \times 100$  мс



## Генерация разряда, видео



Два режима генерации разряда за уступом  
Видеосъемка 300 кадров/с,  $t_{\text{exp}} = 200$  мкс

## Горение этилена на установке ИАДТ-50 ОИВТ РАН

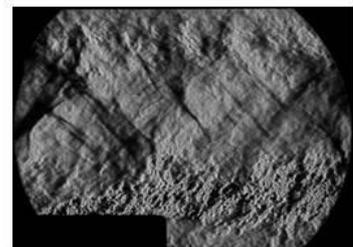
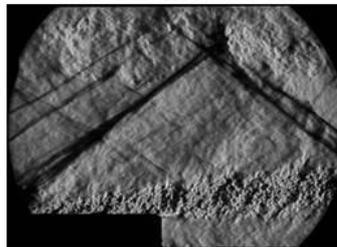
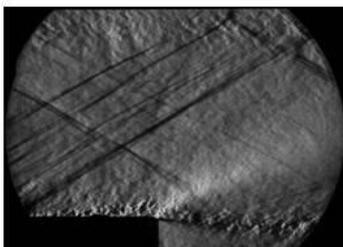
Разряд в потоке.



Инжекция этилена, 2г/с.

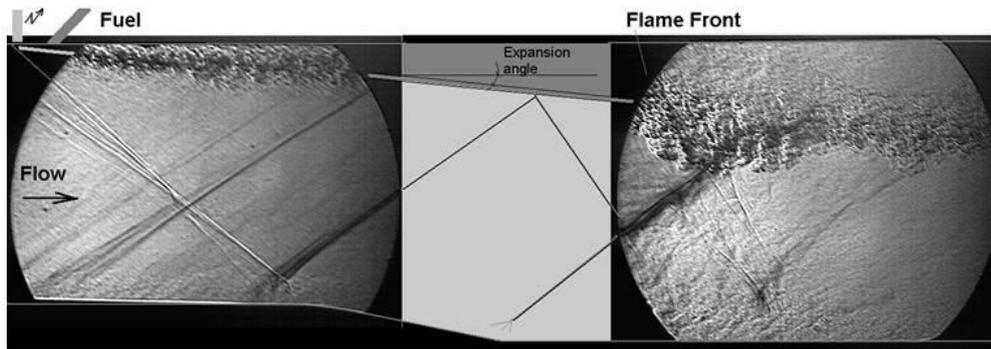


Инжекция этилена, 7г/с.

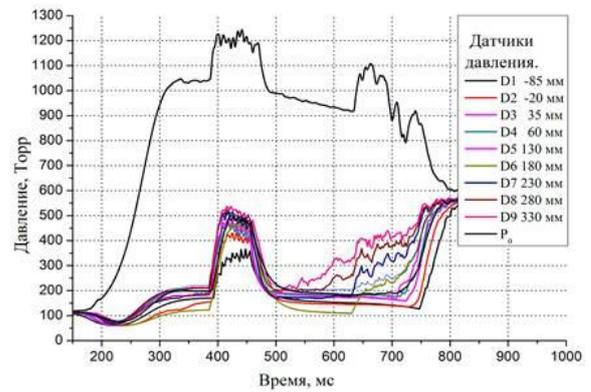
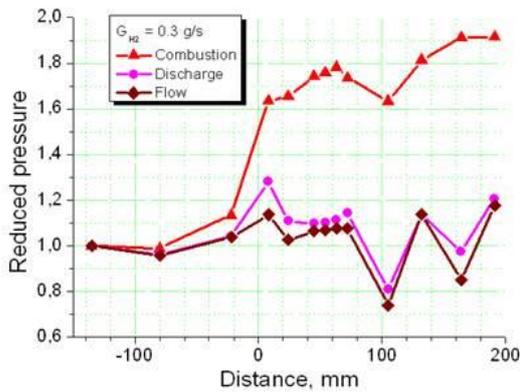


Воздействие режима горения на генерацию разряда: вызванный горением подъем отрывной зоны переводит разряд из продольного в поперечный режим. Стабильность разряда сохраняется.

## Основной эффект: стабилизация плазмы



## Распределение давления и его динамика



## Динамика структуры потока

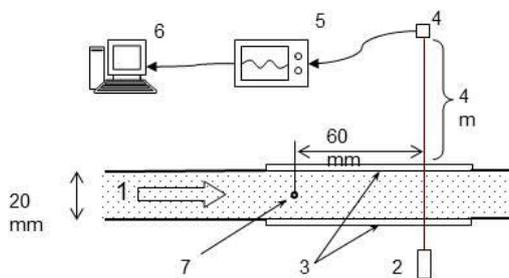
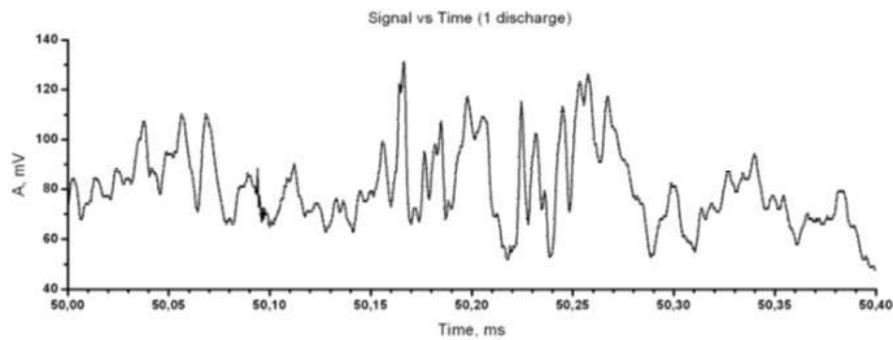
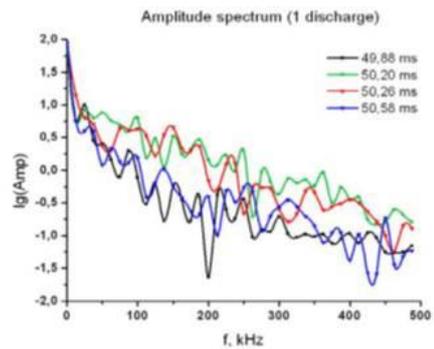


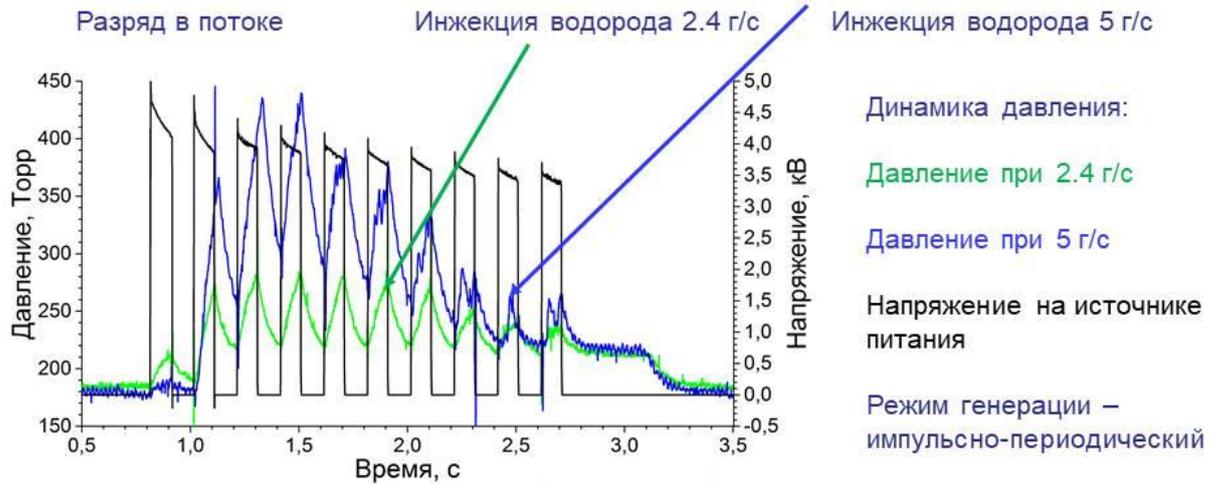
Схема эксперимента. 1 – сверхзвуковой поток,  $M = 2$ ; 2 – лазерный диод; 3 – оптические окна; 4 – фотодиод; 5 – двухканальный осциллограф; 6 – компьютер; 7 – соосные электроды.



В потоке воздуха генерируются газодинамические возмущения в широком частотном диапазоне

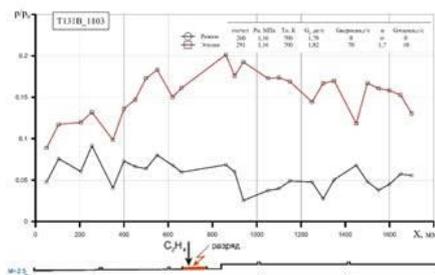
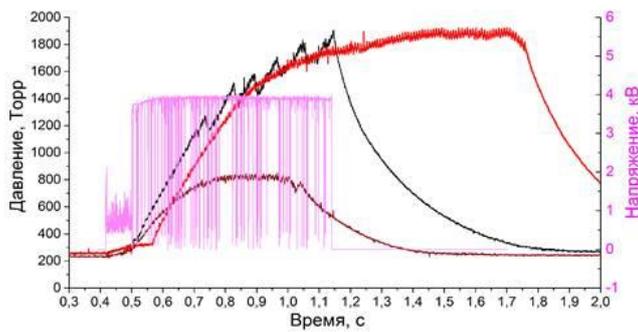
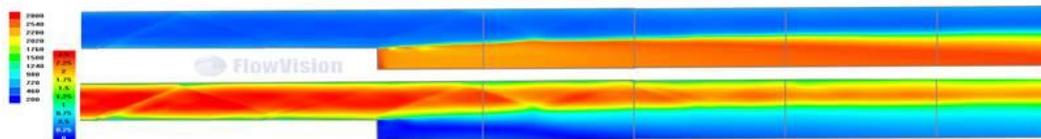
# Горение водорода в холодном воздухе

Воздействие горения водорода на разряд.

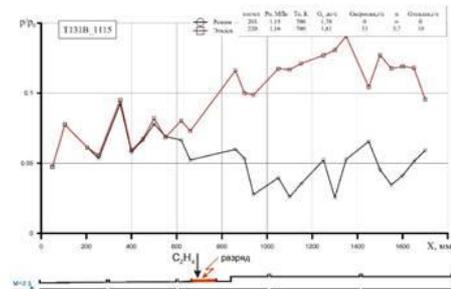


Разряд стабилизирует горение

# Горение керосина, пилотное топливо – этилен



$\alpha=1.8, T_0=700 \text{ K}$



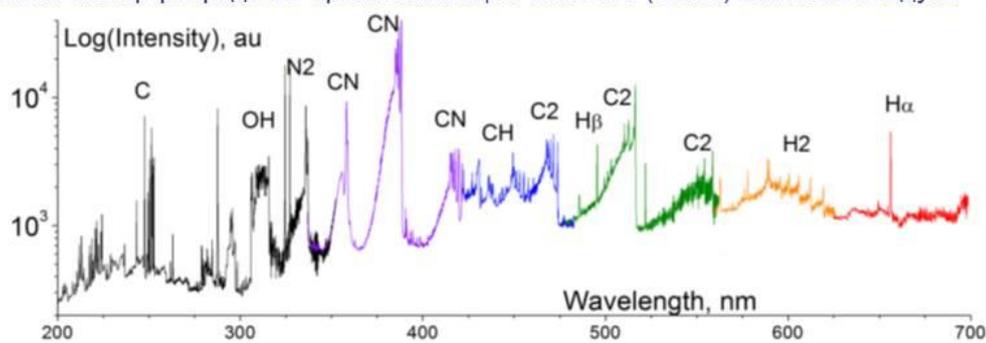
$\alpha=3.7, T_0=700 \text{ K}$

## Стабилизация пламени – основные положения

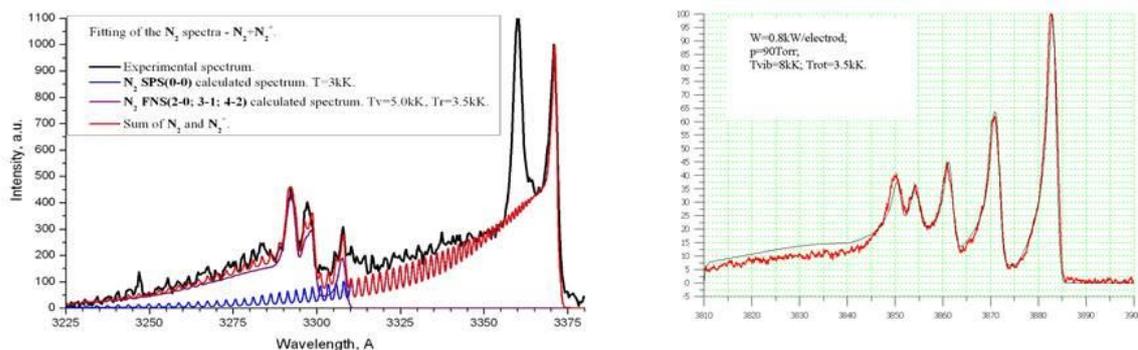
- Энергетический порог воспламенения/стабилизации горения порядка 1-5% энтальпии потока
- Основные параметры разряда, влияющие на горение:
  - Мощность разряда
  - Геометрическая компоновка – время взаимодействия
- Полнота сгорания выше 90% для бедной смеси при оптимальных условиях
- Реализовано воспламенение и стабилизация горения  $H_2$ ,  $C_2H_4$  и керосина в сверхзвуковом потоке  $M=2-2.5$  в диапазоне температур торможения 700 - 900 К.

## Пассивная оптическая спектроскопия

Обзорный спектр разряда во время инъекции этилена ( $C_2H_4$ ) в потоке воздуха

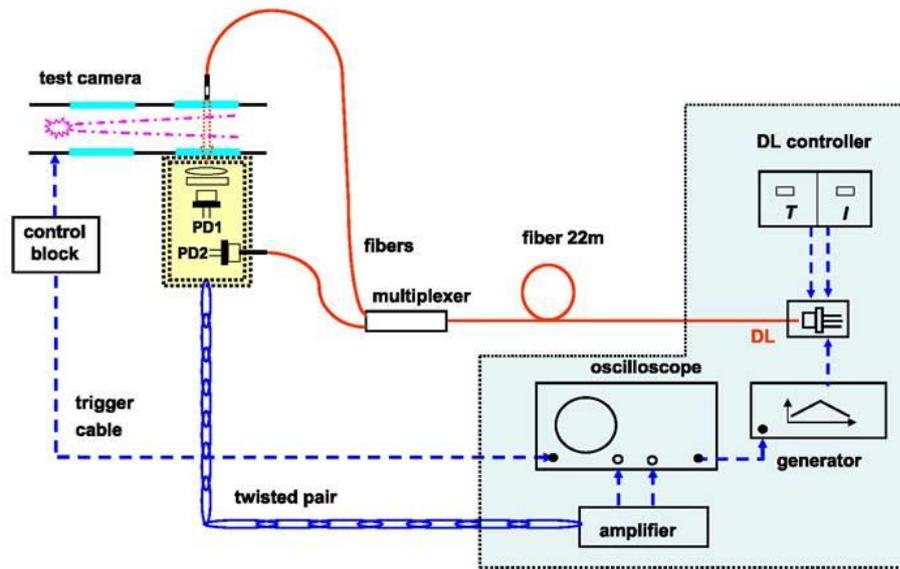


Измерение температуры газа по 2-ой положительной системе азота и фиолетовой циана



**Измеряются параметры горячей области!**

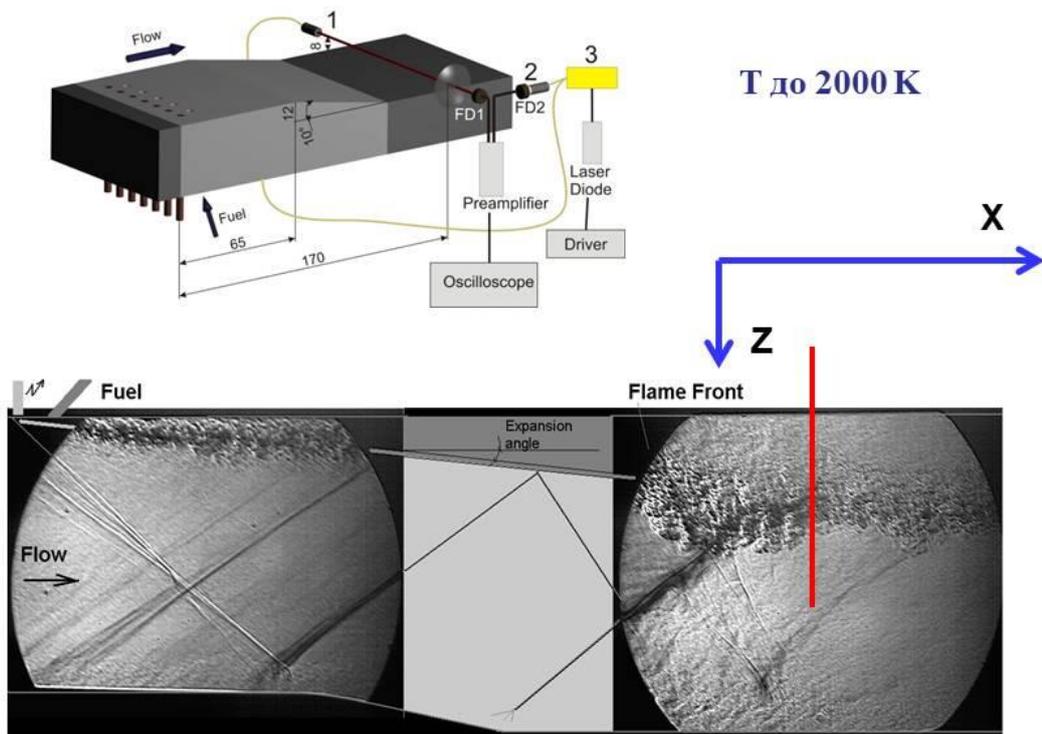
## Диодная лазерная абсорбционная спектроскопия



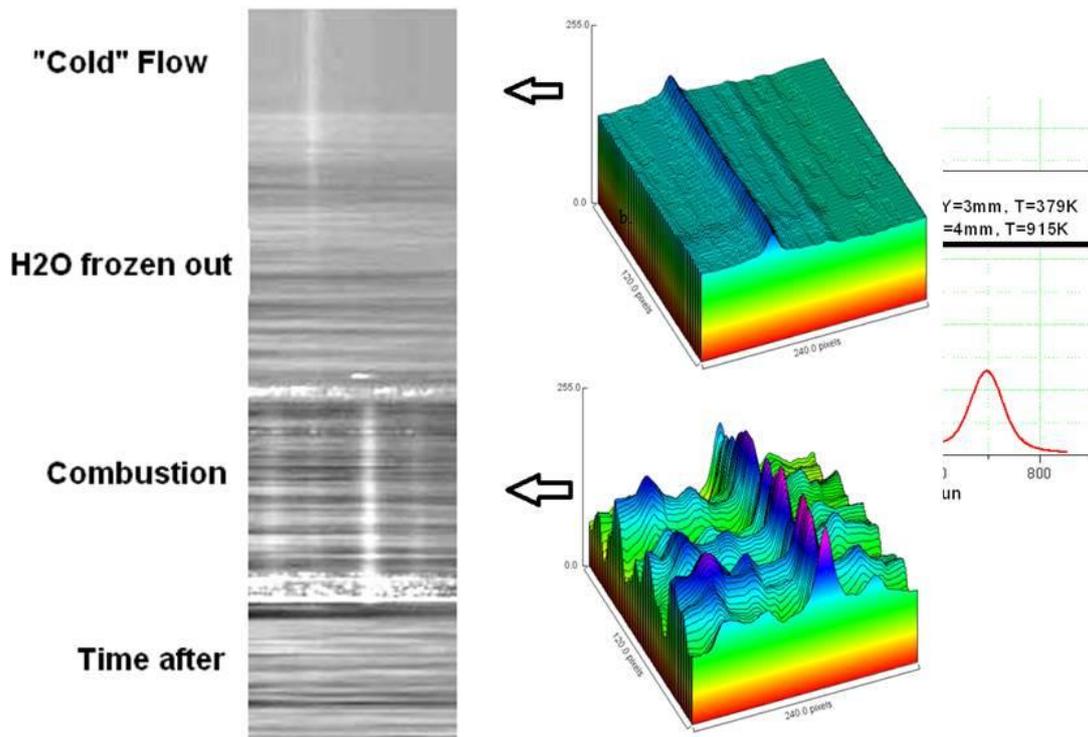
Distributed feedback (DFB) diode laser (NLK1E5GAA, NEL, Japan) with output in the 1.39  $\mu\text{m}$  range.

7189.344  $\text{cm}^{-1}$  ( $E'' = 142 \text{ cm}^{-1}$ )  
 7189.541  $\text{cm}^{-1}$  ( $E'' = 1255 \text{ cm}^{-1}$ )  
 7189.715  $\text{cm}^{-1}$  ( $E'' = 2005 \text{ cm}^{-1}$ )

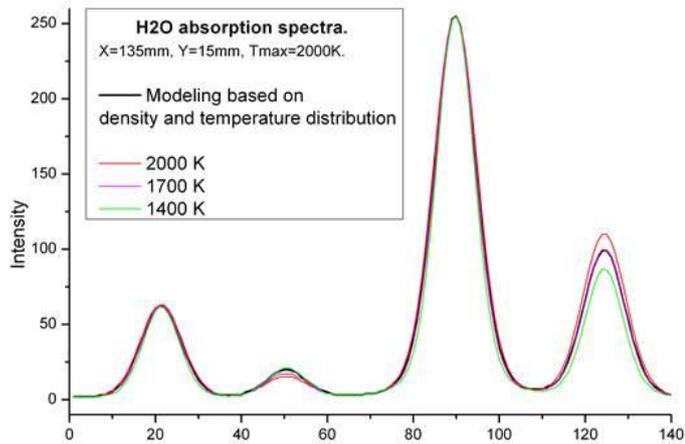
## Измерения температуры $\text{H}_2\text{O}$ в экспериментах по горению в сверхзвуковом потоке



## Динамика спектра поглощения



## TDLAS – Проблема интегрирования по лучу и чувствительности в широком диапазоне температур

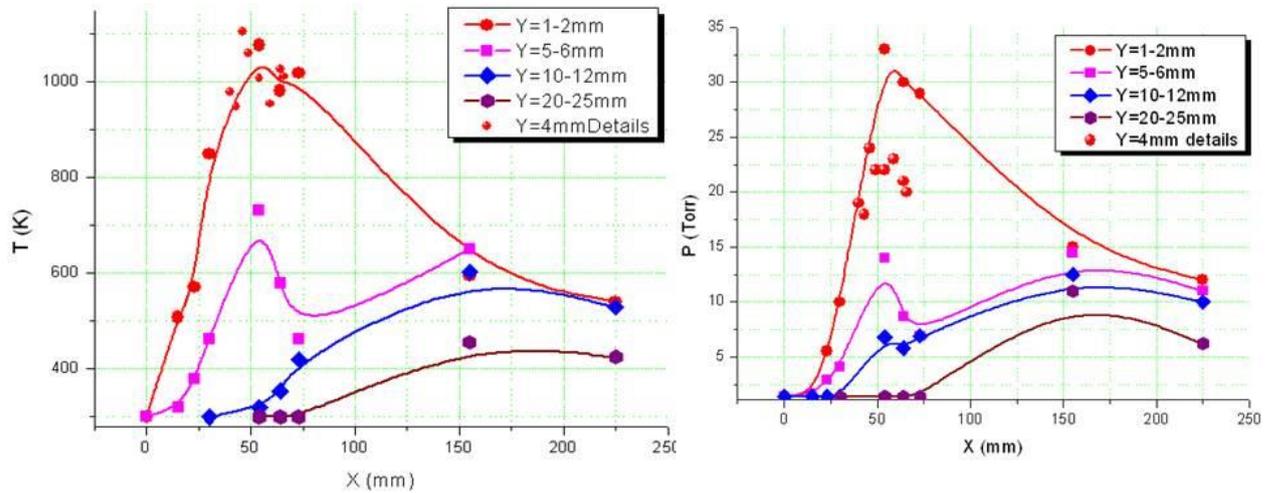


Экспериментальный спектр может не описываться модельным

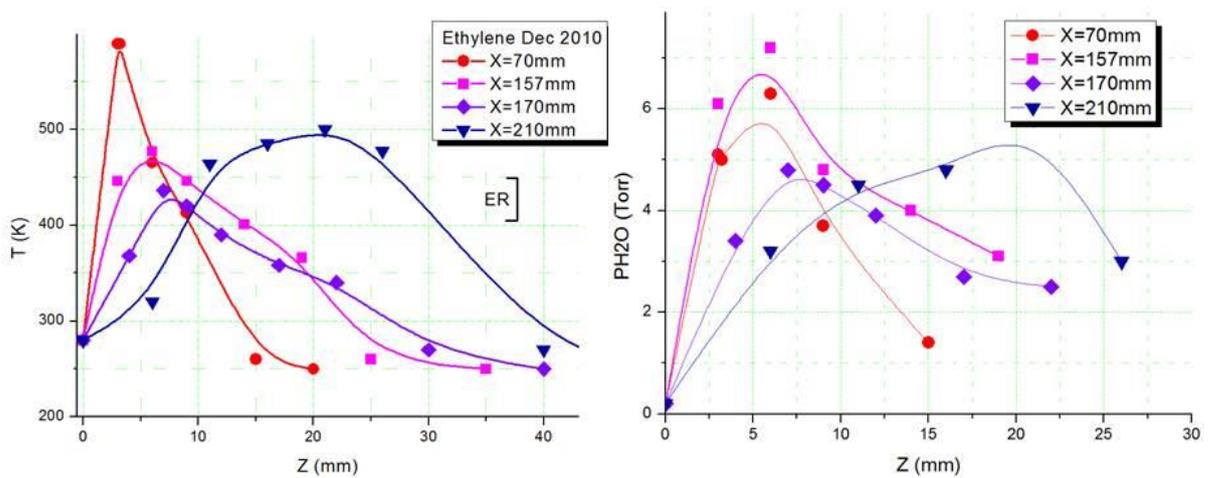


Низкая чувствительность после выше 700 К

## Горение водорода Пространственные распределения $T_{H_2O}$ и $P_{H_2O}$



## Горение этилена Пространственные распределения $T_{H_2O}$ и $P_{H_2O}$



**Экспериментально продемонстрирован  
двухстадийный механизм горения углеводородов.**

## Требования к методам диагностики

- ✓ Отсутствие возмущений в потоке – **оптические методы**
- ✓ Нестационарность процессов – **высокое временное разрешение, меньше 10 мкс**
- ✓ Неоднородность структуры потока – **высокое пространственное разрешение, порядка 1 мм**
- ✓ Неоднородность зоны взаимодействия – **широкий диапазон измерений температуры, 300 - 2000 К**
- ✓ Генерация электрического разряда – **помехозащищённость, учёт излучения плазмы**
- ✓ Турбулентность потока и большие градиенты плотности – **учёт динамики преломления в лазерных методах**
- ✓ Высокая стоимость пуска при высоких параметрах потока – **многоканальность измерений**

# Измерение коэффициента усиления и температуры активной среды

Ю.А. Адаменков

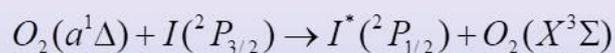
*РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия*

## Лазерный стенд КИЛ-10

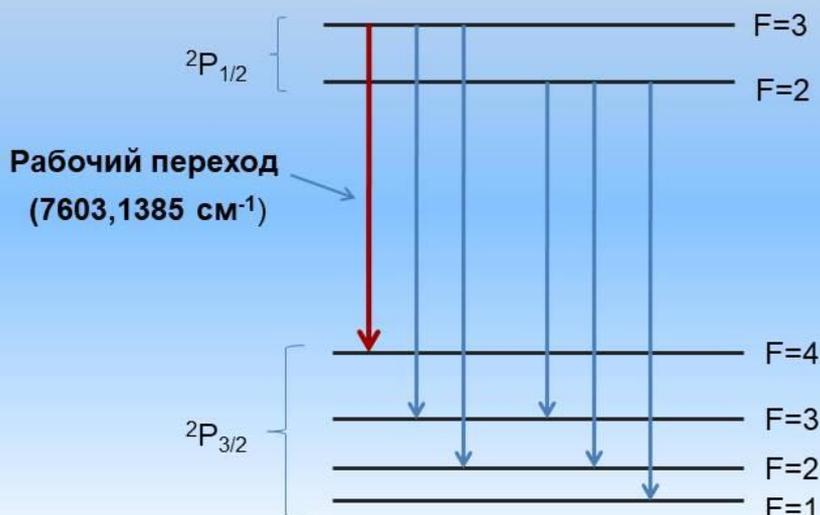


[Квантовая электроника **37**(7), 2007]

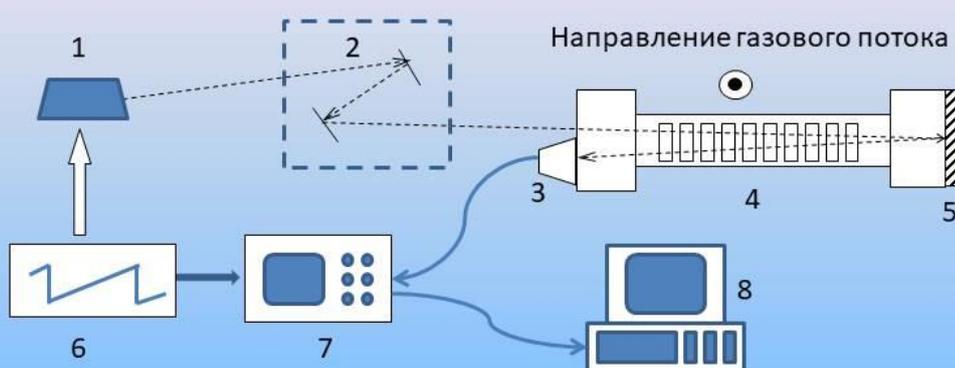
## Создание инверсной населённости в КИЛ:



## Спектроскопия атома йода



## Схема проведения экспериментов



- 1 – Перестраиваемый диодный лазер VORTEX6025,
- 2 – Оптическая система для юстировки,
- 3 – InGaAs-фотоприёмник (ThorLabs PDA-10D),
- 4 – Канал газового потока КИЛ с сопловой решёткой,
- 5 – выходное зеркало оптического резонатора КИЛ,
- 6 – генератор пилообразного напряжения (TaborElec WW5062),
- 7 – записывающий осциллограф (LeCroy)
- 8 – Компьютер

# Усиление и температура

Усиление :

$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{k(\nu) \cdot L}$$

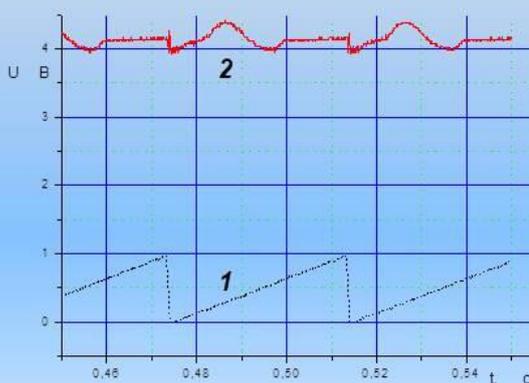
$$k(\nu) = \frac{1}{L} \cdot \ln \left[ \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \right]$$

Допплеровский контур :

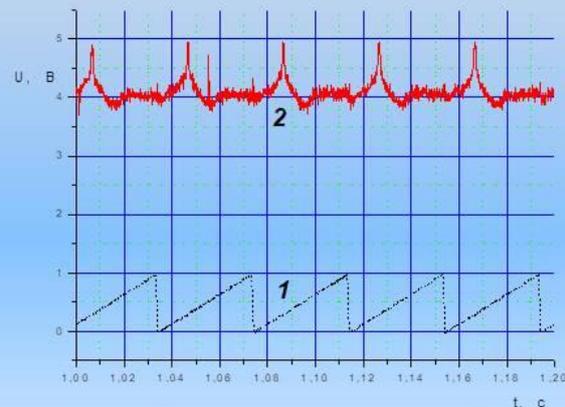
$$\alpha^D = \sqrt{\ln 2} \frac{\nu}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

$$T = \frac{m}{2 \cdot k \cdot \ln 2} \left( \frac{c}{\nu} \cdot \alpha^D \right)^2$$

## Сигнал без усиления и с усилением

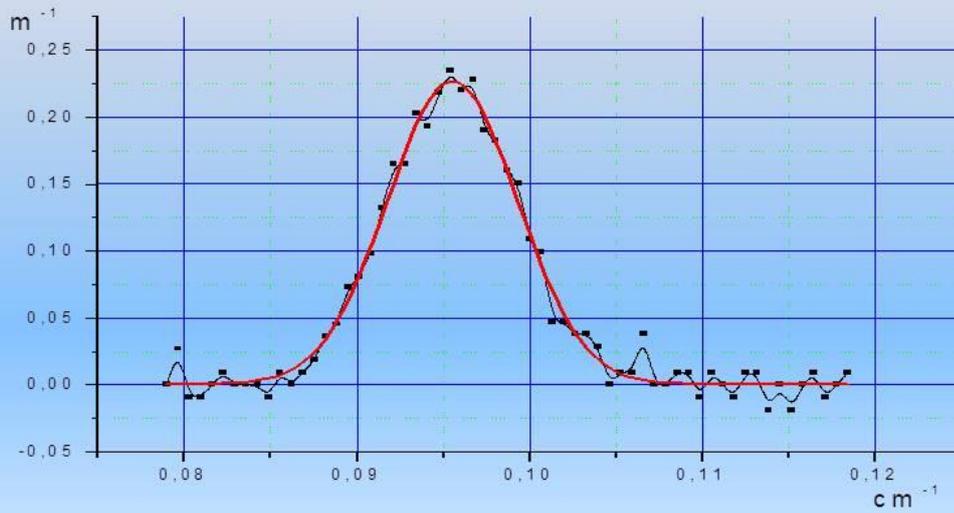


(1) – Управляющий сигнал ПДЛ  
(2) – Сигнал с фотоприёмника  
без усиления в активной среде



(1) – Управляющий сигнал ПДЛ  
(2) – Сигнал с фотоприёмника  
в активной среде с усилением

## Контур усиления



## Результат

Максимум  
усиления

Температура

