

Новое в волоконной оптике для диодной лазерной спектроскопии

**М.И.Беловолов, А.В.Гладышев, К.А. Зыков-Мызин,
А.Е.Левченко, А.Ф.Шаталов**

**НЦВО РАН, г.Москва, 117333, ул.Вавилова, 38
E-mail: bmi@fo.gpi.ru**

Содержание

1. Введение.

2. Новые волоконные световоды и их свойства

2.1. Микроструктурированные (дырчатые) волокна (МСВ)

2.2. Одномодовые D-волокна с чувствительным элементом (ВБР)

3. Новые одночастотные перестраиваемые лазеры

3.1. РОС-лазеры с повышенной мощностью (≥ 50 мВт)

3.2. Спектроскопически селективные одночастотные ПЛ-ФП+ВБР

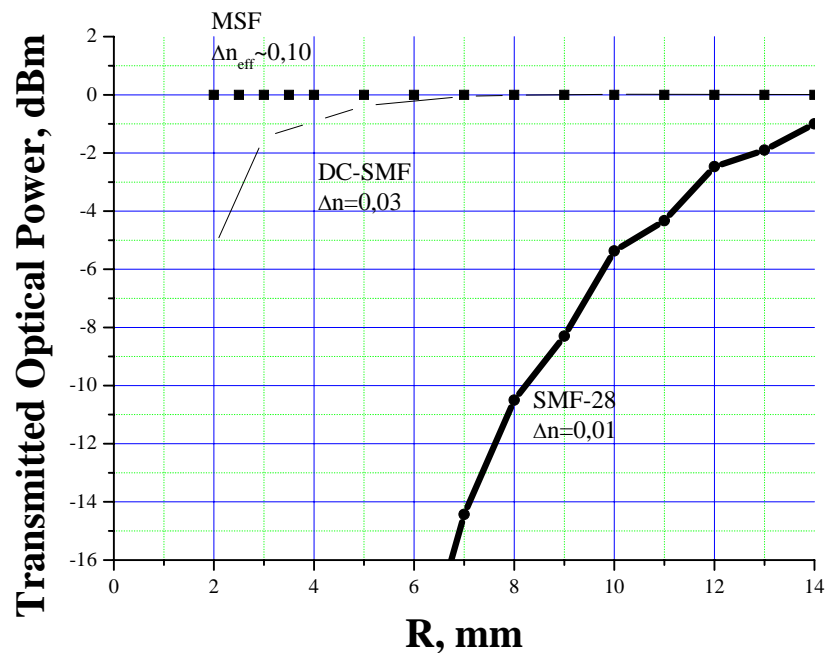
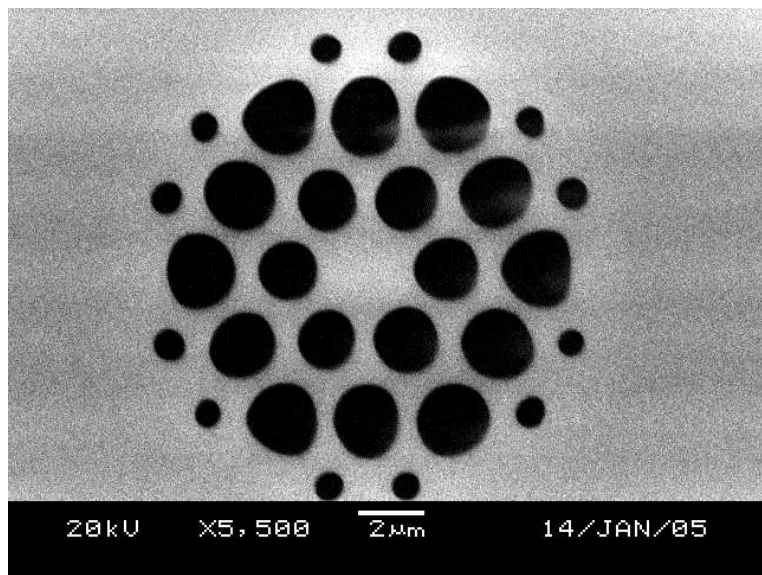
3.3. Одночастотные ПЛ+Yb/Er-ОВС+ВБР с высокой стабильностью частоты

3.4. Одночастотные волоконные РОС-лазеры с широкой непрерывной перестройкой частоты (~40 нм)

4. Заключение.

2. Новые волоконные световоды и их свойства

2.1. Микроструктурированные (дырчатые) волокна (МСВ)



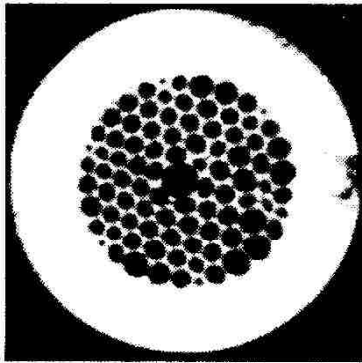
НЦВО РАН, Левченко А.Е.

Микроструктурированный (дырчатый) световод с полой сердцевиной как ячейка для удаленного газоанализа в линии (квазираспределенного)

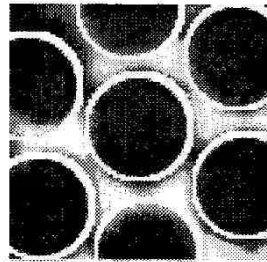
H.Lehmann, S.Bruckner, J.Kobelke, G.Schwotzer, K.Schuster, R.Willsch.

Toward photonic crystal fiber based distributed chemosensor.

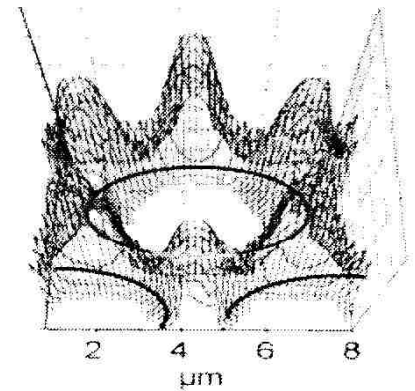
– 17-th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, Bruges, Belgium, 2005; Proc. SPIE Vol. 5855, 419 – 422 (2005).



a) PCF micrograph



b) calculated honeycomb lattice pattern



c) field distribution around a cladding hole

Fig. 5: Field calculation for an isolated hole in the cladding structure of a hollow core fiber.

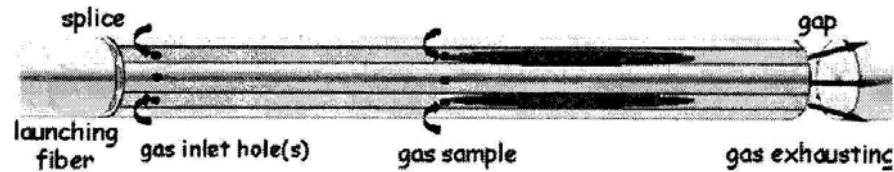
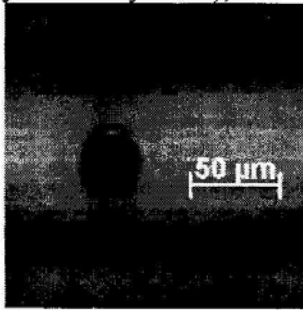
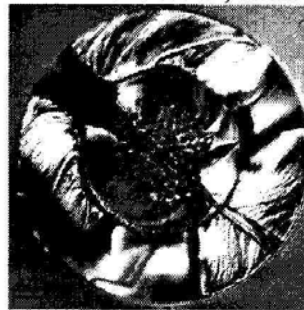


Fig. 6 PCF based quasi-distributed gas sensor (schematically)

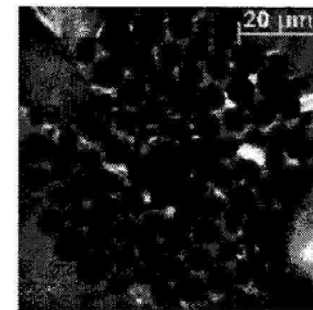
Considering the small diameter of fiber and the brittleness of the fragile PC-structure, the application of gas inlet holes may appear by laser drilling only. Laser drilling attempts on PCF has been performed to several fiber samples using an F-laser (193 nm) with a repetition rate of 50 Hz. The aperture of the laser was masked with a pinhole of 0.4 mm diameter. Fig. 8 shows an example of a laser-drilled radial hole in a hollow core fiber cladded with PDMS (polydimethylsiloxane), drilled with 10^3 laser pulses of 1.98 J/cm^2 , each.



a) cladding view



b) fiber cross section



c) capillary structure cross section

Fig. 7: Laser- drilled hole through a hollow-core PCF structure

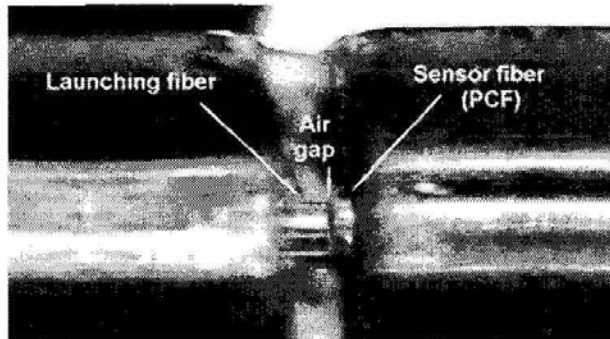


Fig. 3: Fiber/fiber coupling between PCF and launching fiber

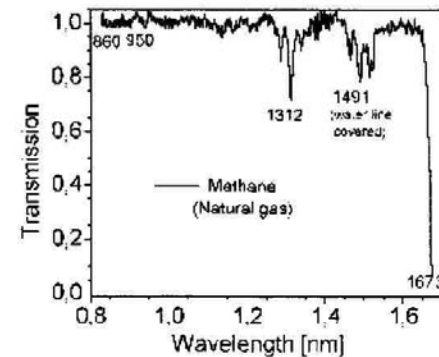


Fig. 4: Methane spectrum, measured by a 1.8 m PCF gas sensor

Газоанализ с использованием микроструктурированных (дырчатых) оптических волокон – новый подход:

- генерация широкополосного излучения в волокне - суперконтинуума (без использования перестраиваемых одночастотных лазеров)
- вакуумное заполнение дырок исследуемым газом (пример – ацетилен)
- оптимизация перекрытия светового поля в волокне с дырками
- получение спектров высокого разрешения

G.Genty, T.Ritari, H.Ludvigsen. **Supercontinuum and Gas Cell in a Single Microstructured Fiber.**
– OFC, 2006, paper OThQ6.

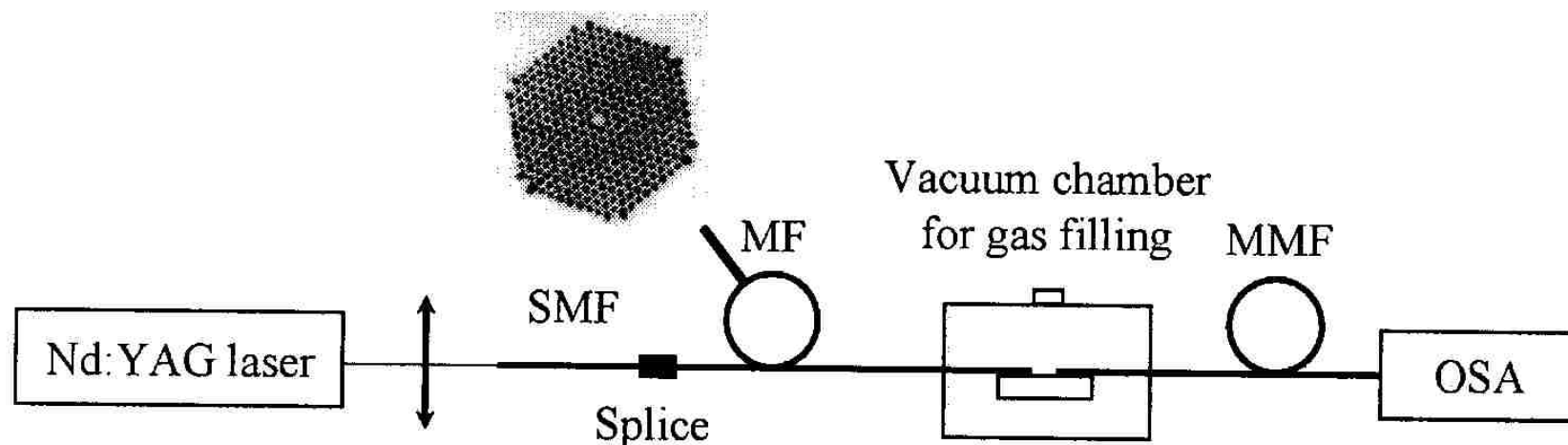


Fig. 1. Experimental setup. SMF: single-mode fiber, MF: microstructured fibers MMF: multi-mode fiber and OSA: optical spectrum analyzer.

Table 1. Characteristics of fiber samples.

λ_{ZD} : zero-dispersion wavelength,
 d : air-hole diameter and Λ : pitch

	MF-2.0	MF-3.2
Core size [μm]	2	3.2
d/Λ	0.65	0.45
λ_{ZD} [nm]	750 & 1670	945
Length [m]	15	19

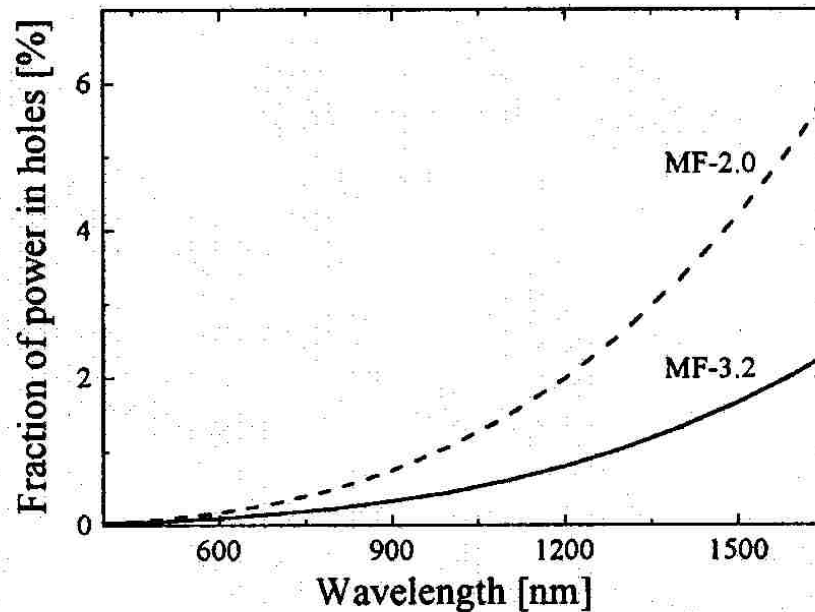


Fig. 2. Percentage of the modal power located in the holes for MF-2.0 and MF-3.2.

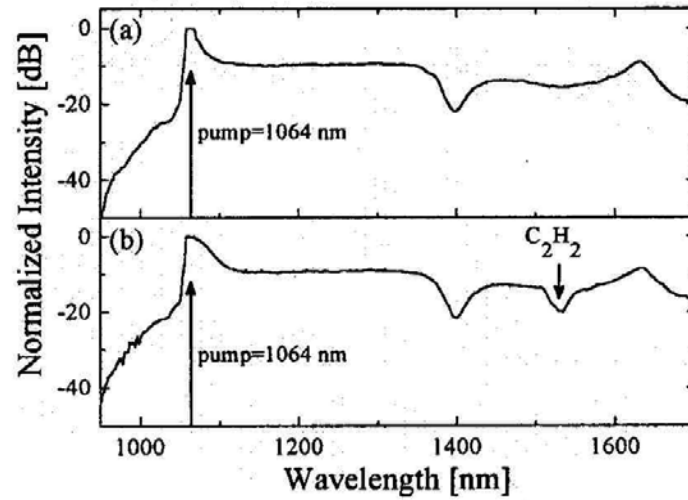


Fig. 3 Supercontinuum generated in MF-2.0 (a) without and (b) with acetylene.

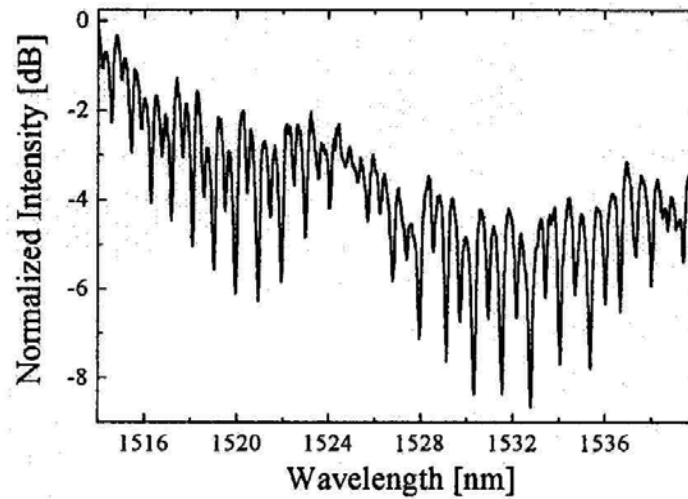


Fig. 4. High-resolution spectrum of the P- and R-branches of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ at 1260 mbar in MF-2.

2.2. Одномодовые D-волокна с чувствительным элементом (ВБР)

Анализ содержания водорода - $H_2 \rightarrow H^+$ (?):

- пленка палладия 2 – 12 мкм на плоском срезе D - волокна
- ВБР в сердцевине D-волокна
- растворение водорода – деформация пленки палладия – деформация волокна и ВБР
- регистрация сдвига Брэгговской длины волны ВБР, калибровка

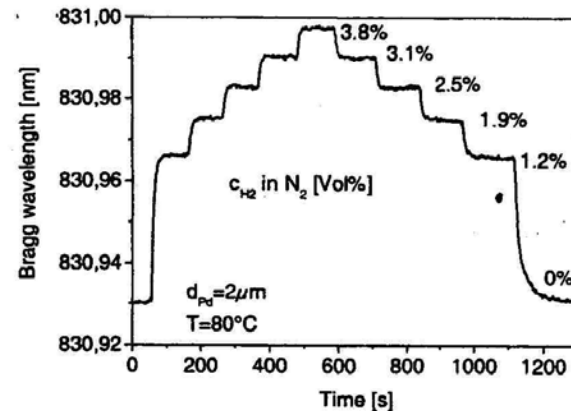
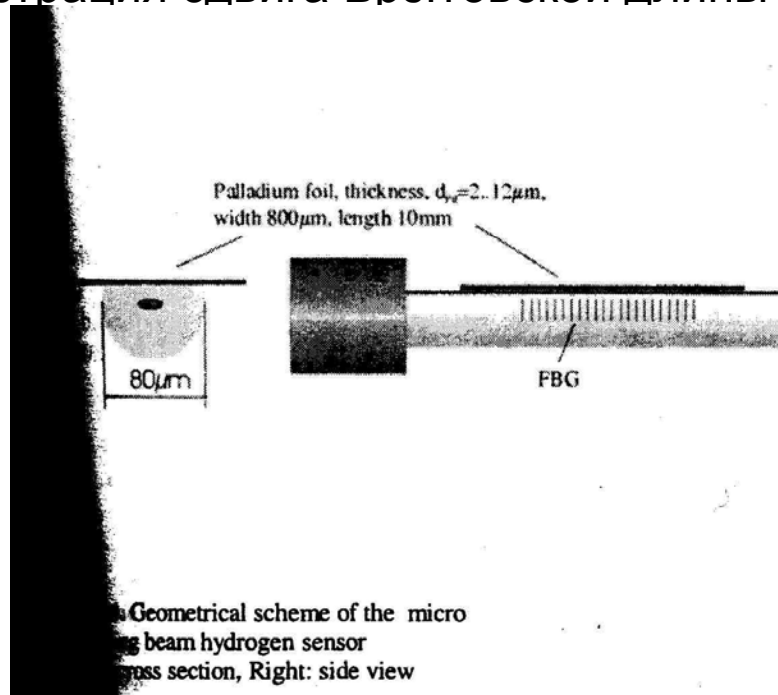


Fig. 5. Bragg wavelength vs. time, stepwise increase and decrease of hydrogen concentration, $d_{Pd}=2\mu m$, $T=80^\circ C$

I.Latka, W.Ecke, B.Hofer, T.Frangen, R.Willsch, A.Reutlinger.

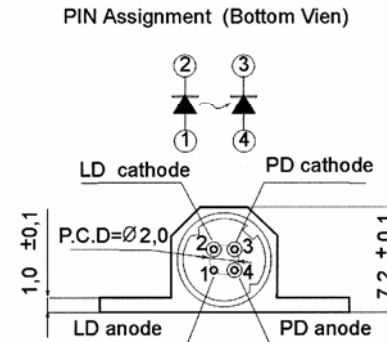
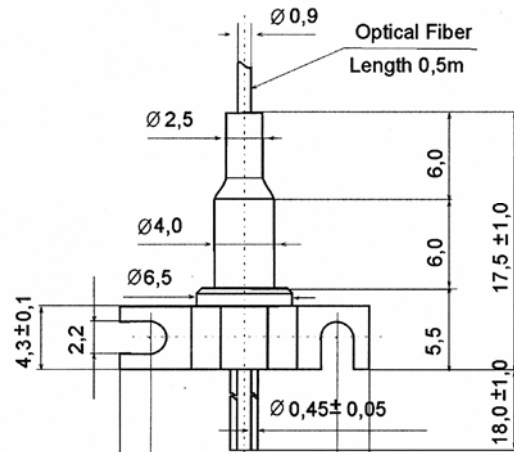
Micro bending beam based optical fiber grating sensors for physical and chemical measurands.

- 17-th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, Bruges, Belgium, 2005; Proc. SPIE Vol. 5855, 91-97 (2005).

3. Новые одночастотные перестраиваемые лазеры

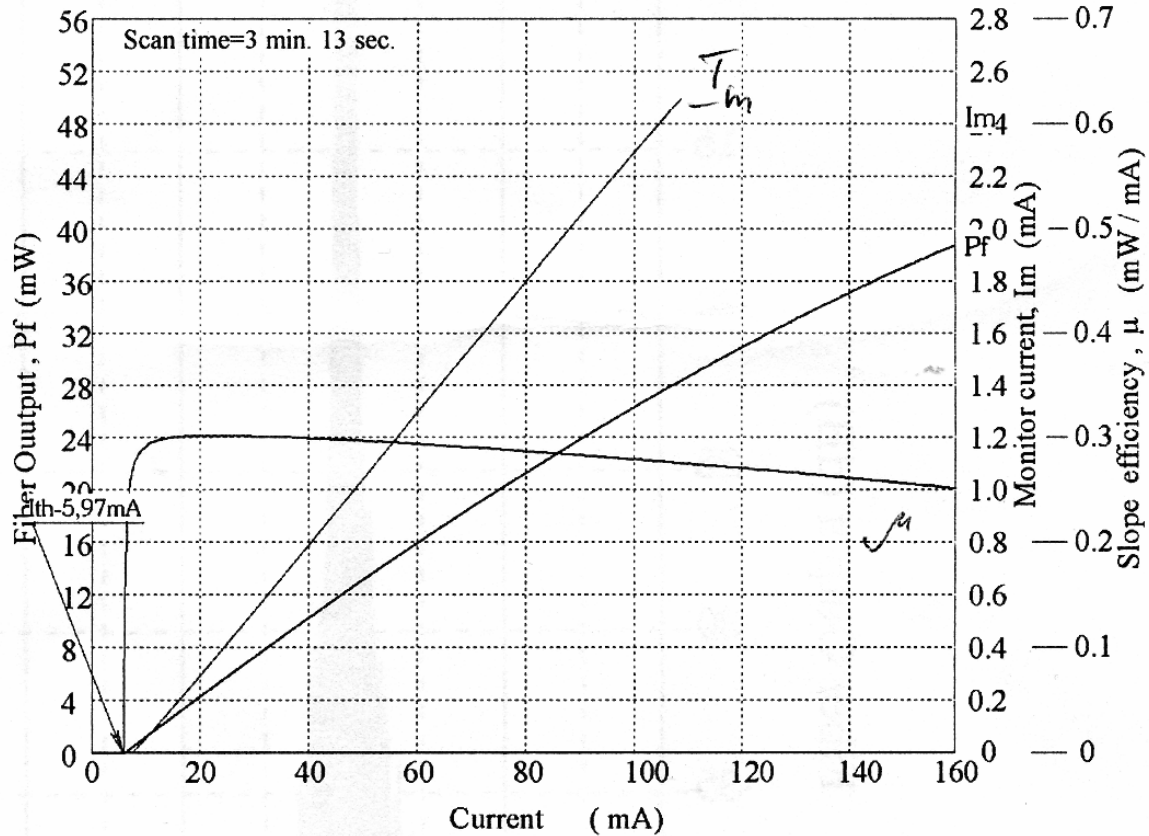
3.1. РОС-лазеры с повышенной мощностью (≥ 50 мВт)

PACKAGE DIMENSIONS (UNIT:mm)



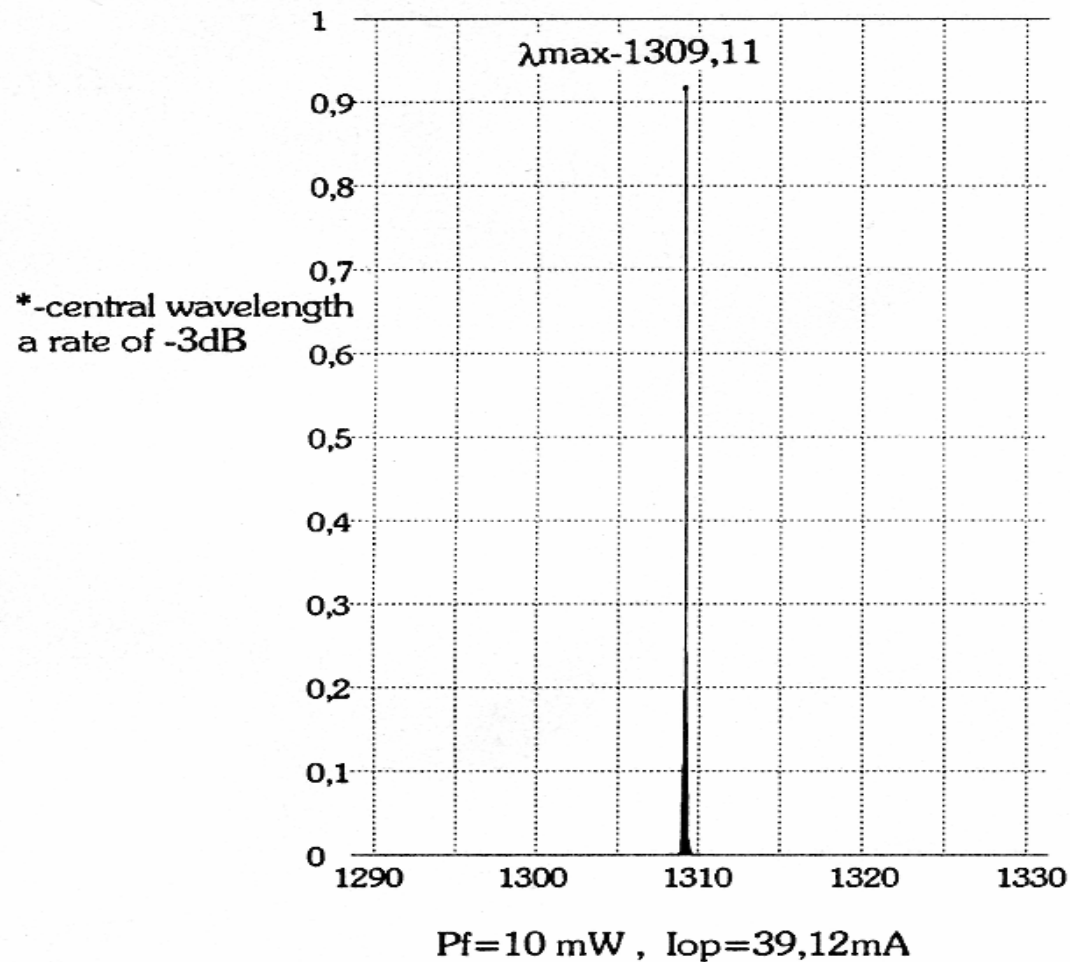
Конструкция модуля лазерного диода с волоконным выходом и встроенным фотодиодом обратной связи (без оптического изолятора).

Light output vs. Forward current



Ватт-амперная характеристика $P_f(I_n)$ лазерного модуля № 6692 с волоконным выходом и зависимость тока встроенного контрольного фотодиода I_m .

$\Sigma\lambda=1309,13\text{nm}$
 $\lambda_c=1309,11\text{nm}^*$
 $\Delta\lambda=0,21\text{nm}$



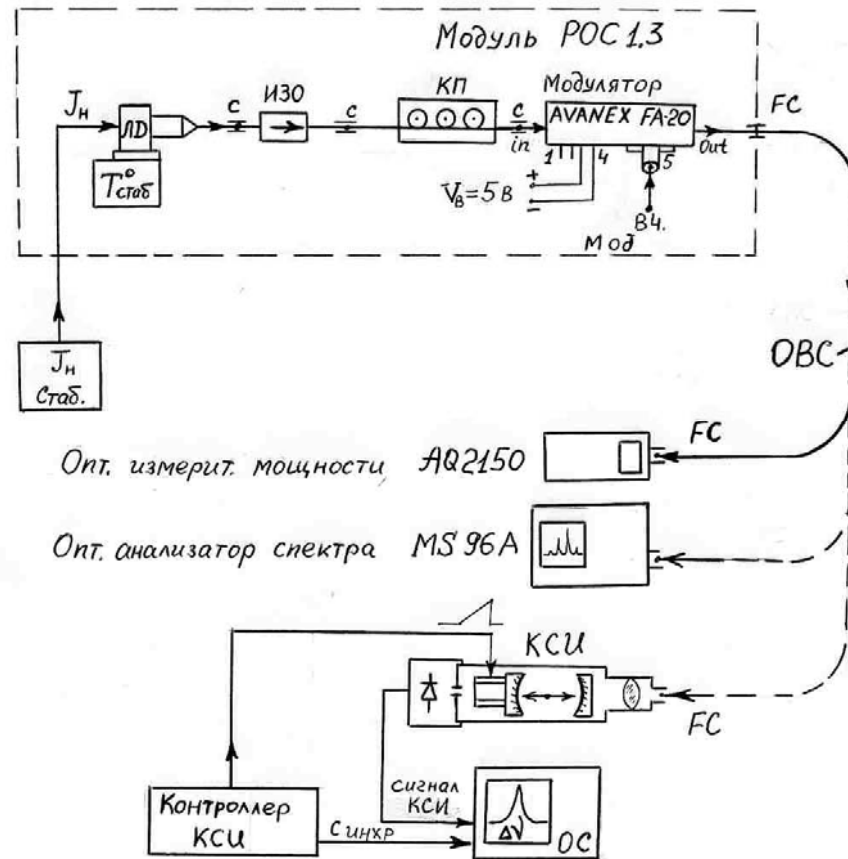
Спектр излучения лазерного диода № 6692 с волоконным выходом, записанный при выходной мощности $P_f = 10$ мВт и токе накачки $I_n = 39,12$ мА. Ширина спектра по уровню -3 дБ равняется 0,21 нм (см. таблицу 1).

Таблица 1. Параметры лазерной генерации (паспортные данные) лазерного модуля № 6692 с волоконным выходом на одномодовом световоде.

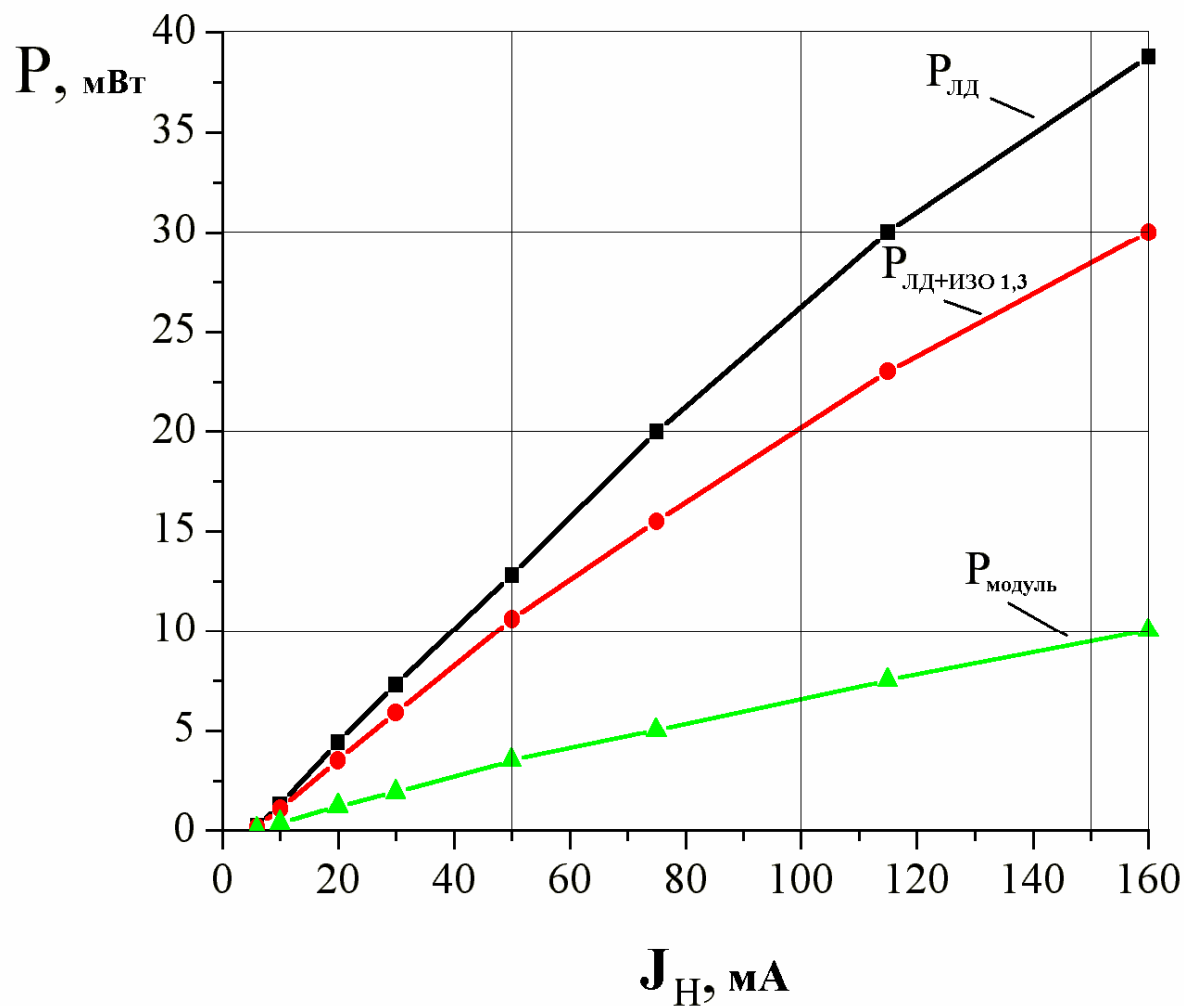
Ambient-temp., $t=22\text{ C}$

Date: 10.05.06

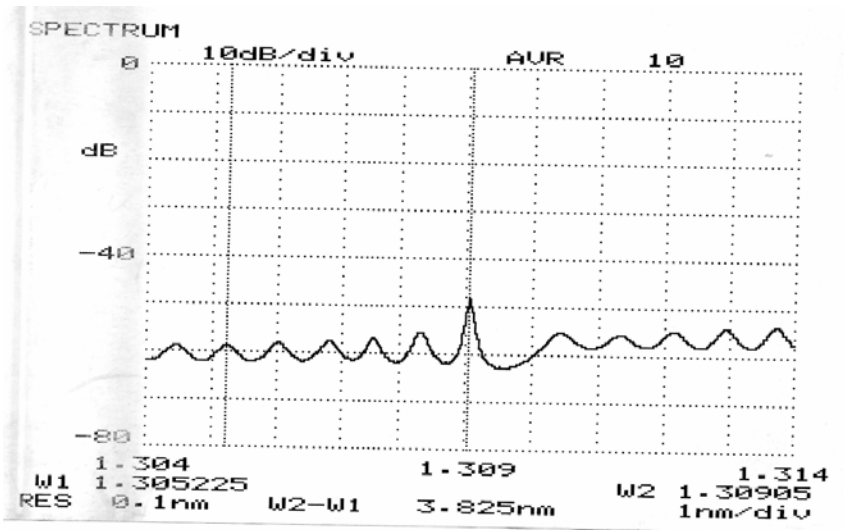
Symbol	Parameter	Test data				Unit
I_{th}	Threshold current	5,97				mA
P_f	Light output from fiber	10	20	30	38,8	mW
I_{op}	Operating current	39,12	75	115,84	160	mA
I_m	Monitor current	806	1714	2499	2499	$\mu\text{ A}$
μ	Slope efficiency	0,3	0,289	0,2725	0,2515	mW/mA
$\Sigma\lambda$	efficient wavelength	1309,13	1309,53	1309,98	1310,13	nm
$\Delta\lambda$	band width at rate of -3dB	0,21	0,21	0,21	0,21	nm



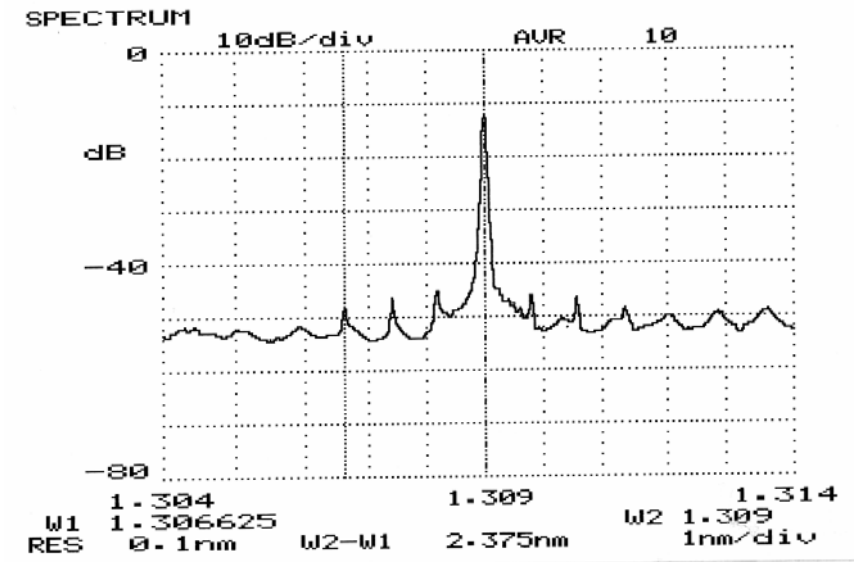
Оптическая схема одночастотного лазерного модуля на 1,3 мкм и схема его подключения для измерения выходной оптической мощности с помощью измерителя AQ2150 (Ando), анализа спектрального состава излучения с разрешением 0,1 нм с помощью анализатора спектра MS96A (Anritsu) и анализатора тонкой структуры и формы линии одночастотной генерации с помощью конфокального сканирующего интерферометра КСИ со спектральным разрешением $\delta\lambda \sim 10^{-4}$ нм.



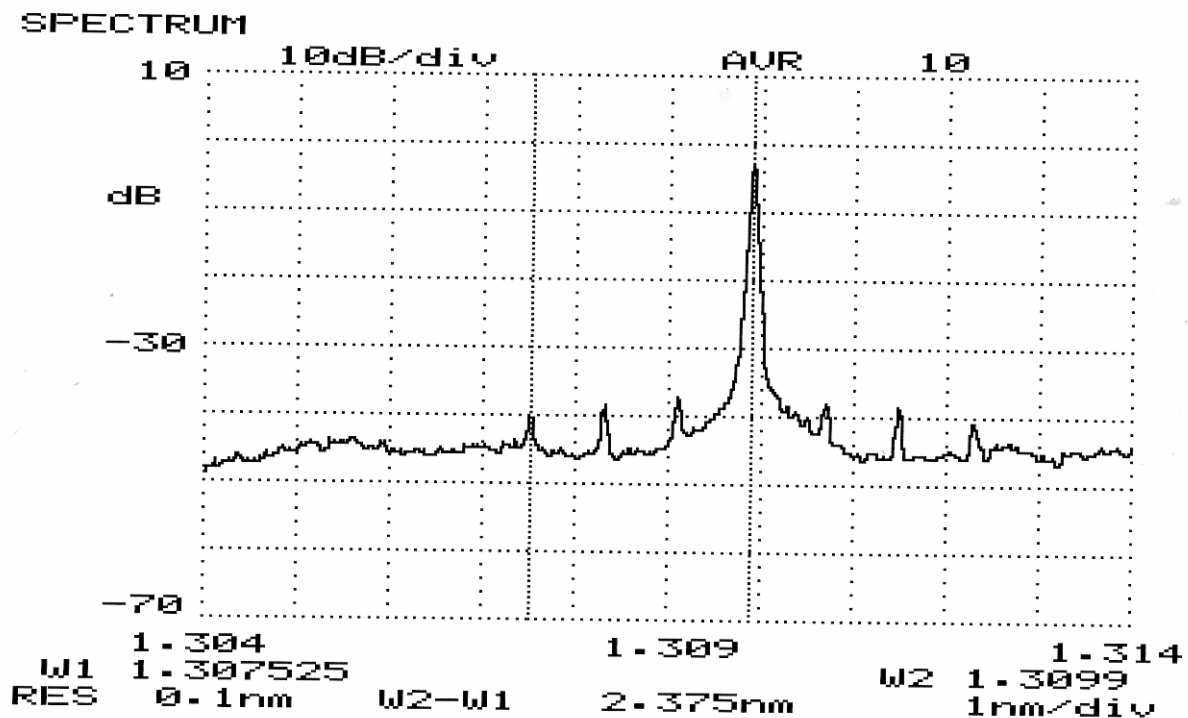
Ватт-амперные характеристики исходного лазерного модуля с РОС и волоконным выходом РЛД, выходной мощности после стыковки оптического изолятора РЛД+ИЗО1,3 и выходной оптической мощности $P_{модуль}$ на выходе модуля после модулятора.



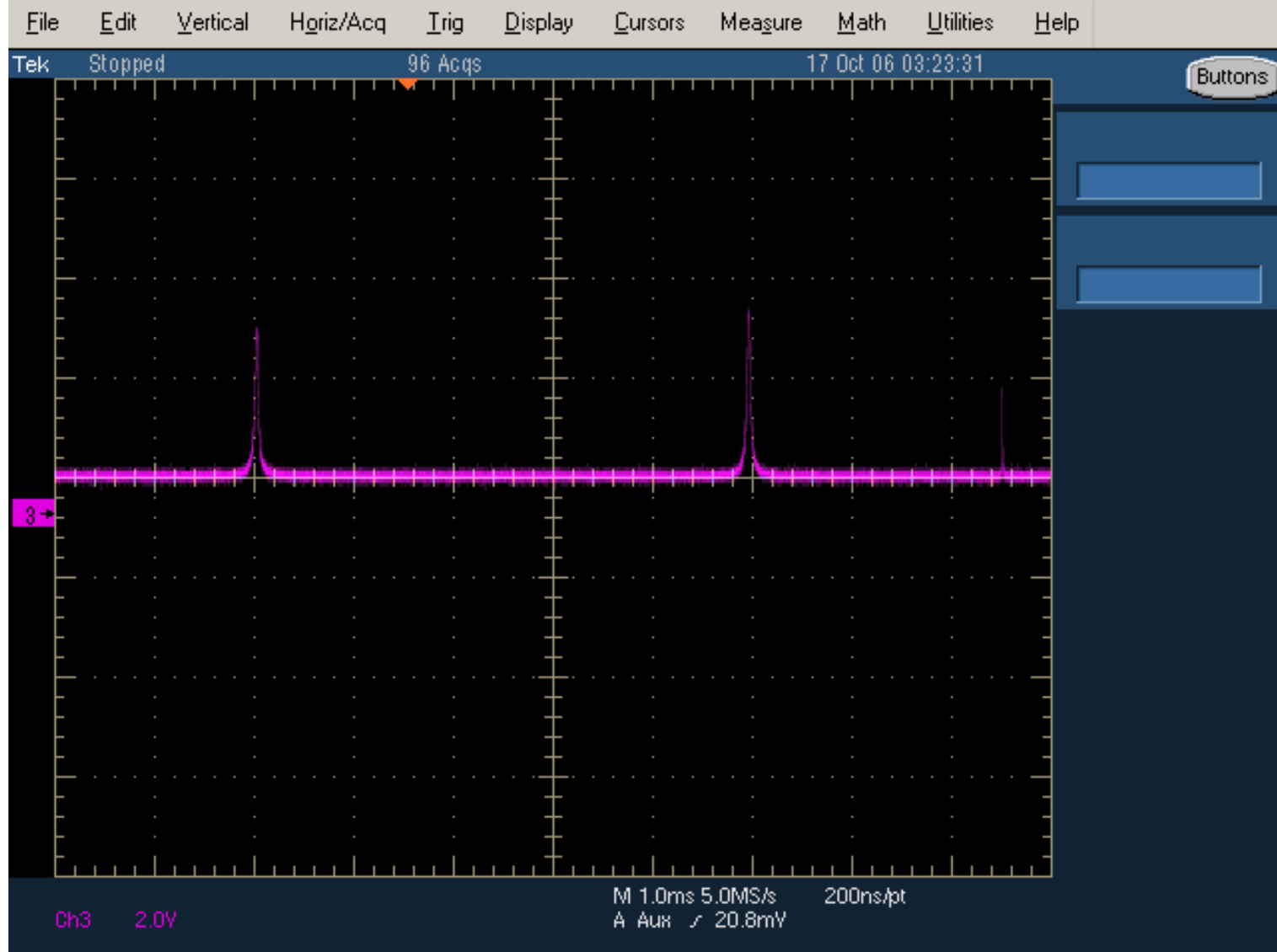
Спектр излучения лазерного диода при токе инжекции $J_n = 5$ мА (ниже порога).



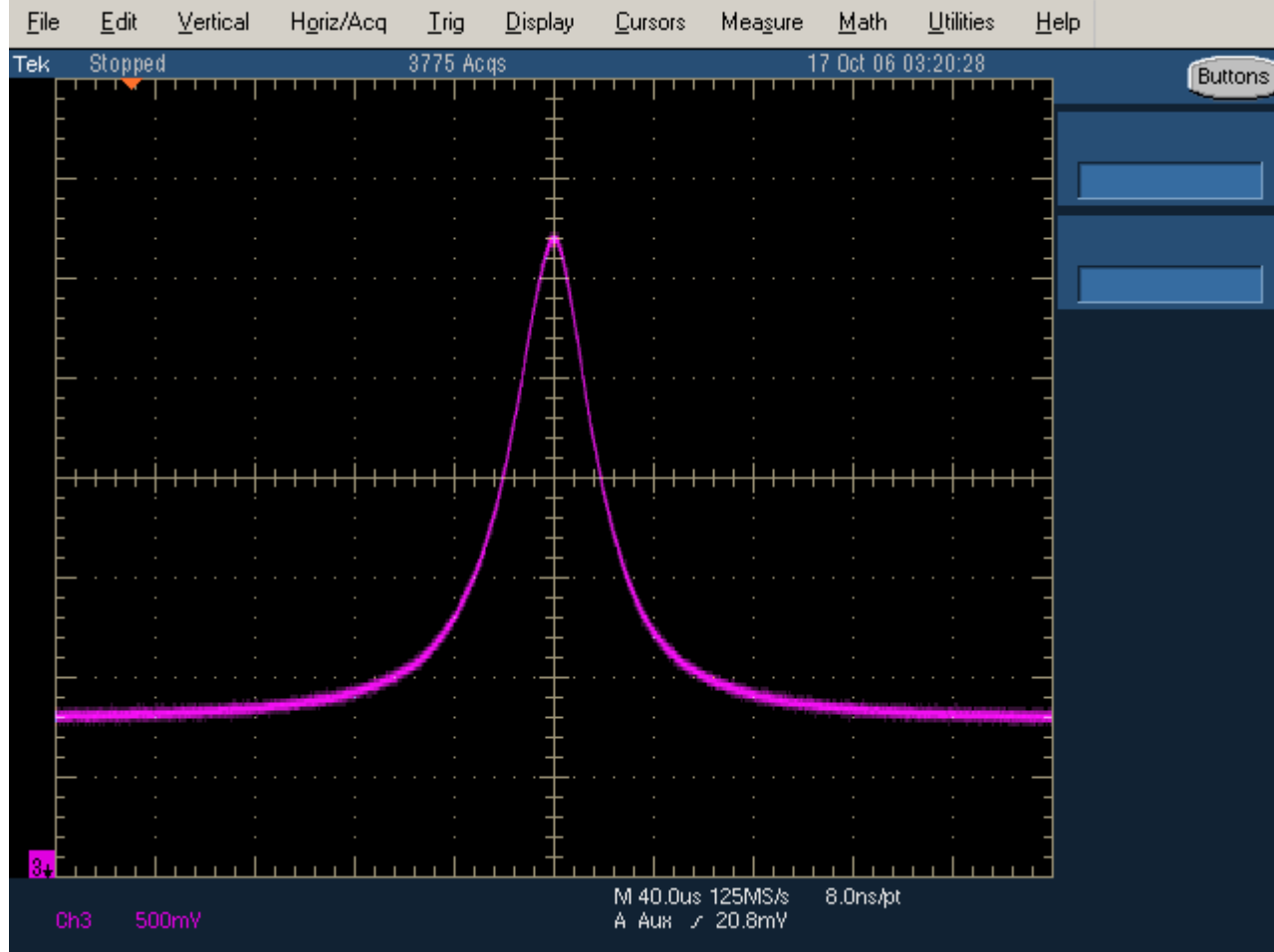
Спектр развитой одночастотной лазерной генерации при $J_n = 10$ мА. Небольшое превышение порога (~ в 1,5 раза), степень подавления боковых мод 30 дБ.



Спектр одночастотной генерации лазерного модуля на 1,3 мкм при токе инжекции $J_n = 110$ мА. Подавление боковых мод > 30 дБ

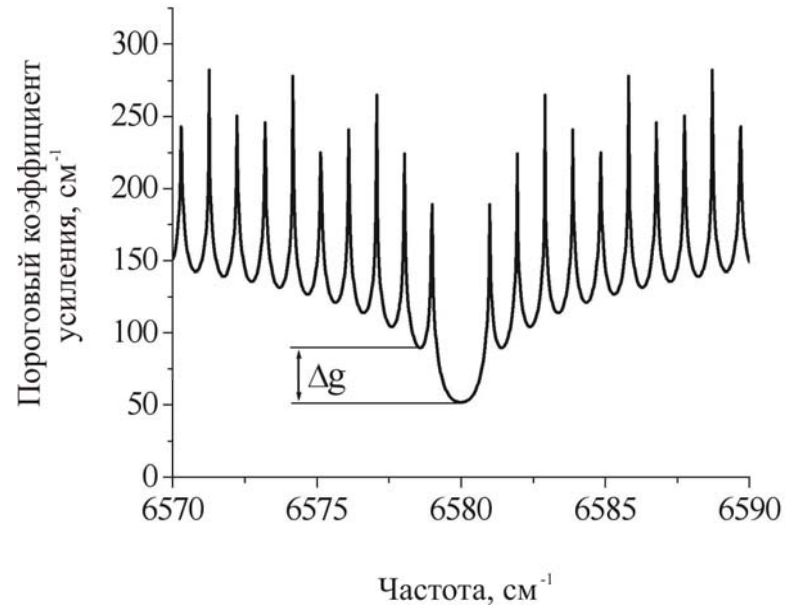
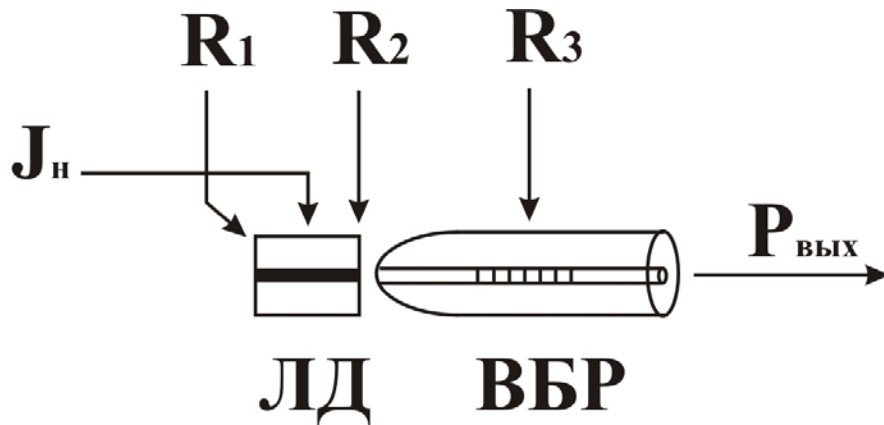


Одночастотный спектр генерации лазерного модуля на 163 мкм, зарегистрированный с помощью КСИ с областью свободной дисперсии 1,5 ГГц (масштаб расстояния между двумя резонансами на экране).



Форма линии генерации одночастотного лазерного модуля на 1,3 мкм, зарегистрированная с помощью КСИ. Масштаб развертки по частоте – 15 МГц/дел. Лоренцевская форма линии, полуширина $\delta\nu_{\text{изм}} = 15$ МГц.

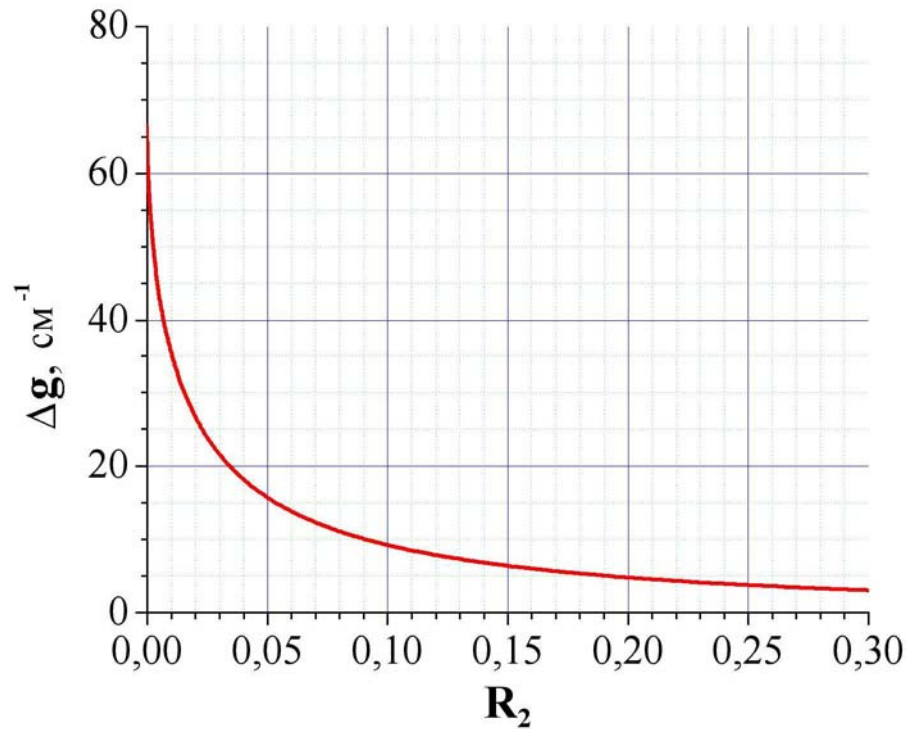
3.2. Спектроскопически селективные одночастотные перестраиваемые ПЛ-ФП+ВБР для газоанализа (НЦВО, ЦЕНИ, НОЛАТЕХ, 2002 – 2005 гг.)



Конструкция резонатора ЛД-ФП с ВБР.

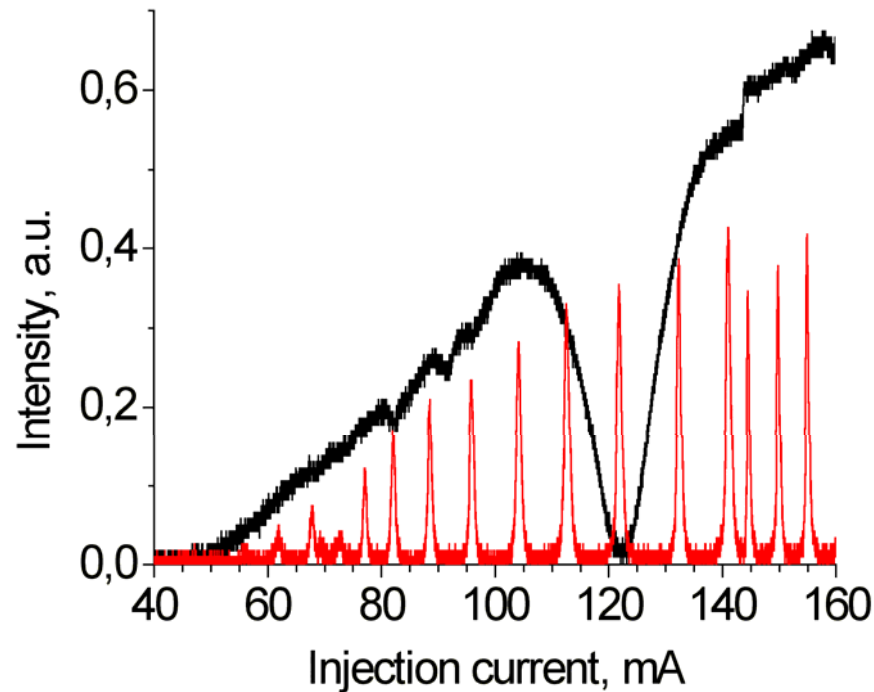
Спектральная зависимость порогового коэффициента усиления ЛД с ВБР при $r_2=0$, $r_3(\lambda_{\text{Бр}})=0,7$, $\Delta\lambda_{\text{ВБР}}=0,5$ нм

Оптимизация по коэффициенту отражения переднего зеркала R2 (просветление передней грани резонатора ФП)



Зависимость разности коэффициентов усиления основной и боковой моды ЛД с ВБР от коэффициента отражения ($R_2=r_{22}$) передней грани ЛД.

Регистрация аммиака на 1,52 мкм с помощью ПЛ-ФП+ВБР

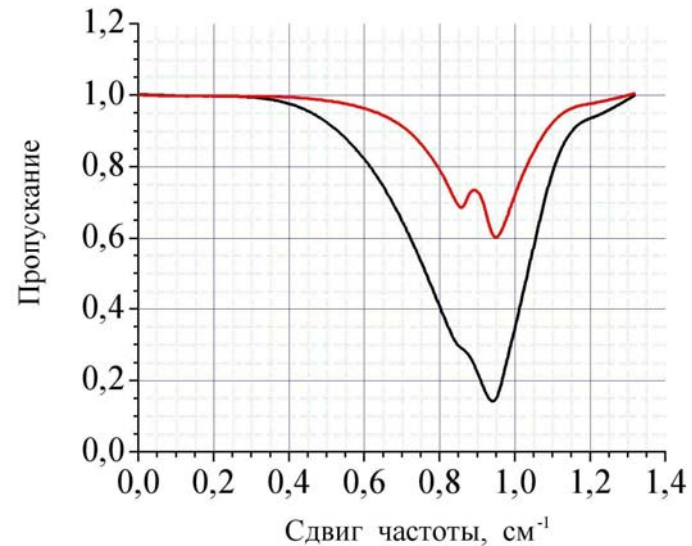
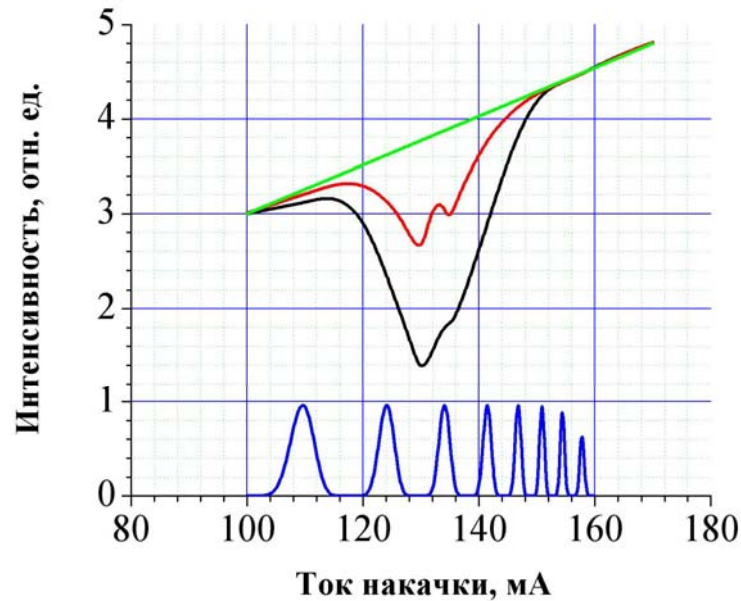


Контур спектральной линии аммиака на длине волны 1,52 мкм, регистрируемый с помощью перестраиваемого диодного лазера с гибридным резонатором на волоконной брэгговской решетке.

А.В. Гладышев, М.И. Беловолов, С.А. Васильев, В.П. Дураев, О.И. Медведков, А.И. Надеждинский, Е.Т. Неделин, Я.Я. Понуровский, “Непрерывно перестраиваемый одночастотный диодный лазер на длину волны около $\lambda = 1,52$ мкм для целей газоанализа”.

Квантовая электроника, 2005, т.35, №3, стр.241-242

Пример регистрации метана на 1,65 мкм с помощью перестраиваемого одночастотного ПЛ-ФП+ВБР



A.V.Gladyshev, M.I.Belovolov, S.A.Vasiliev, E.M.Dianov, O.I.Medvedkov, A.I.Nadezhdinskii,
O.V.Ershov, A.G.Beresin, V.P.Duraev, E.T.Nedelin.

Tunable single-frequency diode laser at wavelength $\lambda = 1,65 \mu\text{m}$ for methane concentration measurements.
– Spectrochimica Acta Part A, 2004, vol.60 , 14, p.3337 – 3340,.

3.3. Одночастотные ПЛ-ФП+Yb/Er-ОВС+ВБР с высокой стабильностью частоты

W.H.Loh, R.I.Laming, M.N.Zervas, M.C.Farries, U.Koren.

Single frequency erbium fiber external cavity semiconductor laser.

– Appl.Phys.Lett., 66 (25), 3422-3424 (1995).

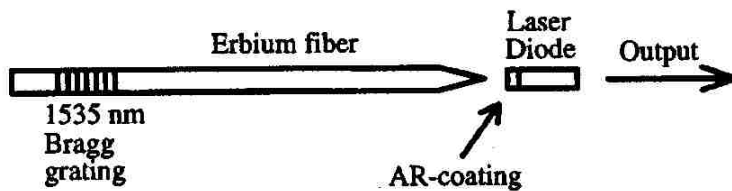


FIG. 1. Schematic of external cavity laser configuration.

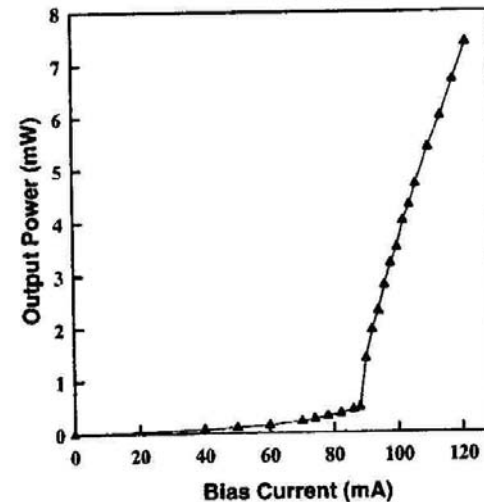


FIG. 2. Light-current characteristic of 3 m long Er^{3+} -fiber external cavity laser.

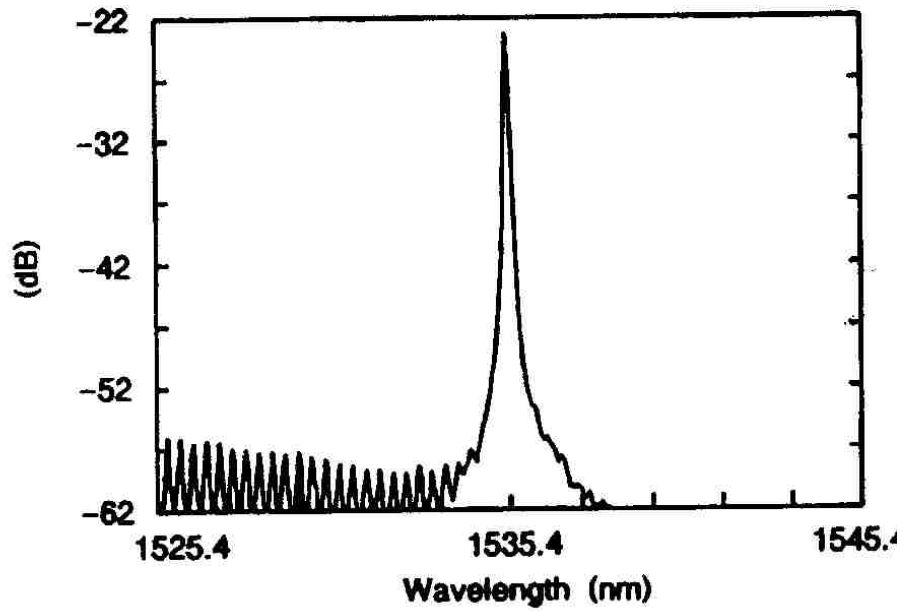


FIG. 3. Optical spectrum of laser at maximum bias.

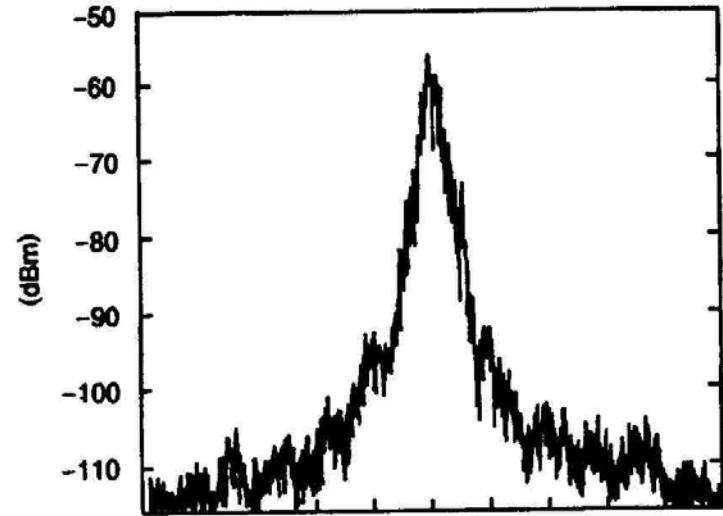


FIG. 4. Delayed self-heterodyned beat spectrum of 3 m long Er^{3+} -fiber external cavity semiconductor laser. (Horizontal axis is 10 kHz/div, centre frequency 100 MHz.)

$$\Delta\nu \sim 1 \text{ kHz}$$

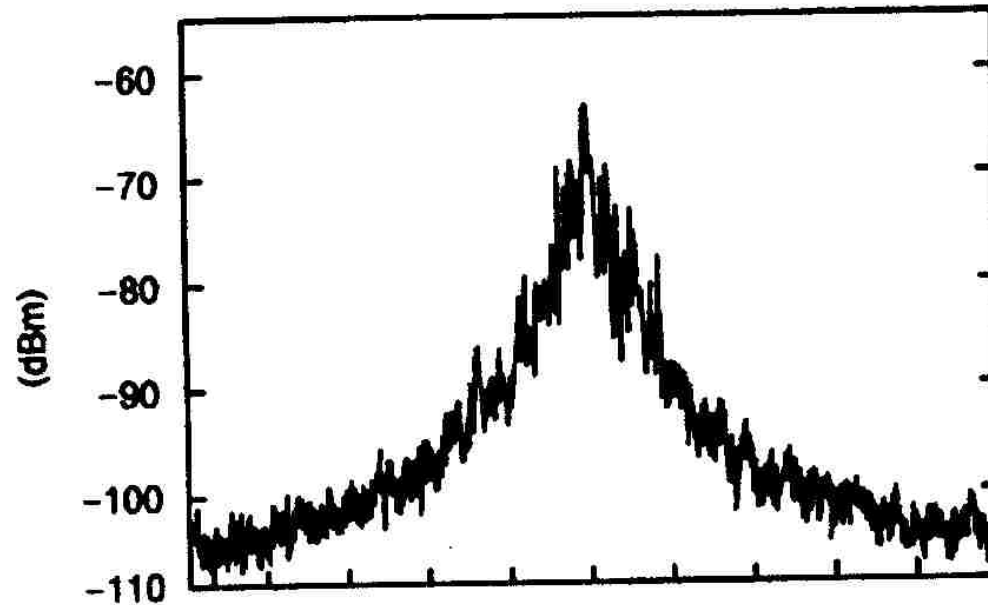


FIG. 5. Delayed self-heterodyned beat spectrum of 0.43 m long external cavity laser with 17 cm length Er^{3+} fiber. (Horizontal axis is 50 kHz/div, centre frequency 100 MHz.)

Укорочение длины резонатора до 0,4 м и 17 см Er^{3+} -волокна привело к уширению линии до $\Delta\nu \sim 8$ кГц, нестабильность и дрейф в пределах ~ 100 МГц.

Одночастотные волоконные РОС-лазеры с высокой стабильностью частоты генерации

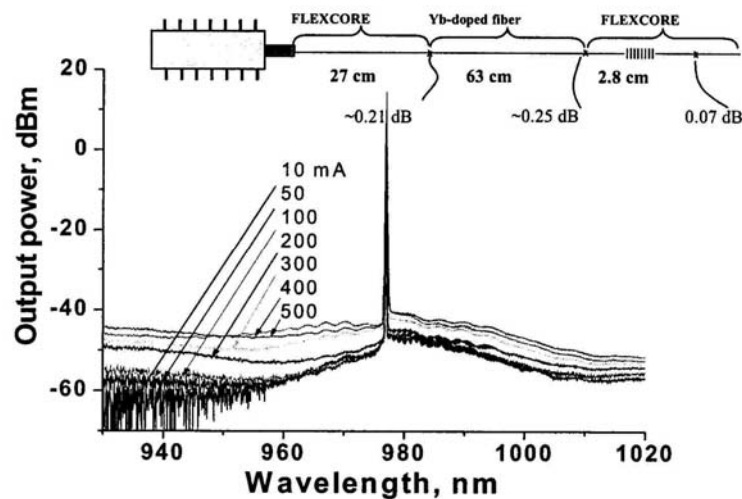


Fig. 3. SDL-2 spectra as a function of drive current with the Yb-doped fiber as an intra-cavity element. The inset shows the cavity design.

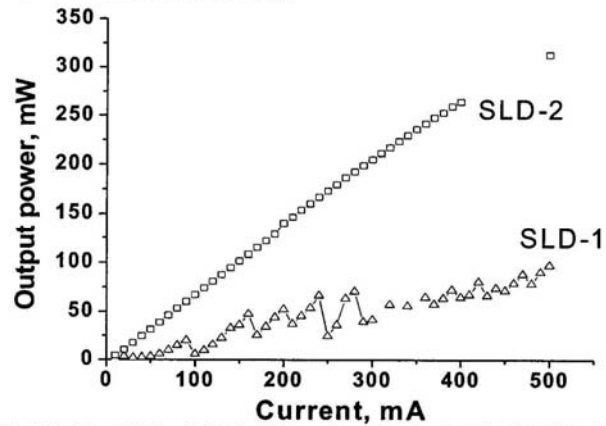


Fig. 4. L-1 characteristics of SDL-2 with the cavity configuration shown in Fig. 3 (□), and for SDL-1 (Δ).

Table 1: Summary data on lasers with an external cavity used in experiments

Laser	SDL1	SDL2
Semiconductor chip FP mode spacing, nm	0.086	0.085
Doped fiber type	YbH	YbL
Doper Fiber length, cm	12.2	63
Doped fiber absorption bandwidth (FWHM), nm	~4	~1.9
Doped fiber absorption, dB/cm	3.3	0.23
FG bandwidth (FWHM), nm	0.21	0.2
FG reflectivity, %	75	80
Bragg wavelength, nm	976.55	976.6

Two cavities were fabricated for these experiments, each with similar Bragg grating, but different absorption and length of Yb doped fiber, as described in Table 1.

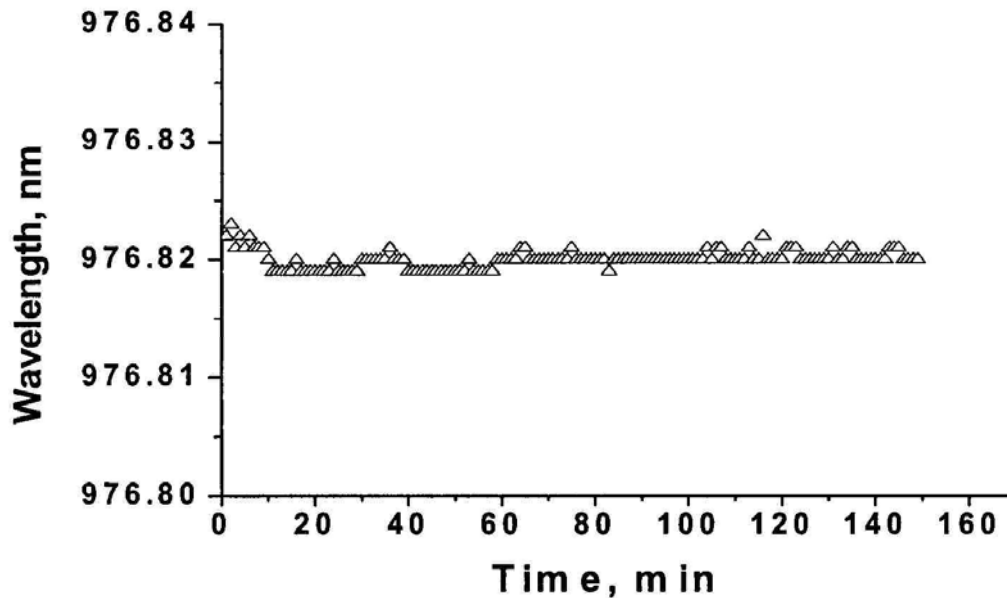


Fig. 6. Long term operating wavelength stability of SDL2 external resonator laser measured with a wavelength meter.

3.4. Одночастотные волоконные РОС-лазеры с широкой непрерывной перестройкой частоты (~40 нм)

M.Ibsen, S.Y.Set, G.S.Goh, K.Kikuchi. **Broad-Band Continuously Tunable All-Fiber DFB Lasers.**
– IEEE Photonics Technology Letters, Vol.14, No 1, 21-23 (2002).

Er/Yb – одномодовое волокно с большими концентрациями, 4 см,
В сердцевине записаны ВБР со сдвигом по фазе на π (244 нм)

Накачка на 976 нм мощностью 70 мВт,

Генерация 10 мВт в области 1,55 мкм.

Перестройка – изгибом несущей пластинки с волоконным лазером –
сжатие или растяжение ВБР.

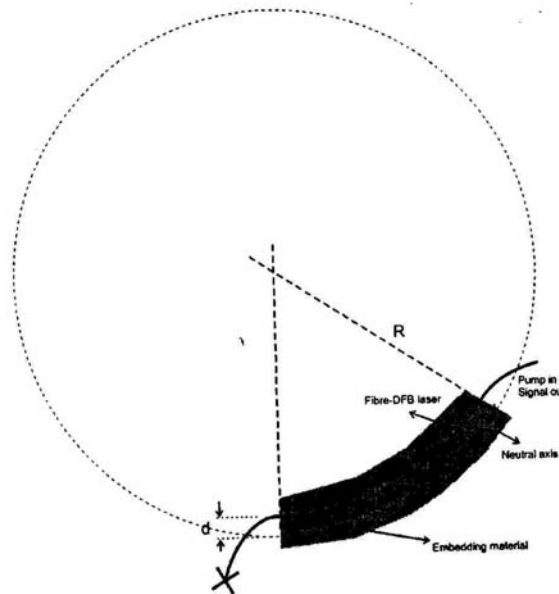


Fig. 1. Schematic principle of beam-tuning technique with indication of the bending arc radius R and the positioning d of the device under test relative to the neutral axis.

Широкая перестройка частоты генерации – 27 нм.

- Стабильность выходной мощности.
- Компактность конструкции.
- Предпочтительно сжатие.

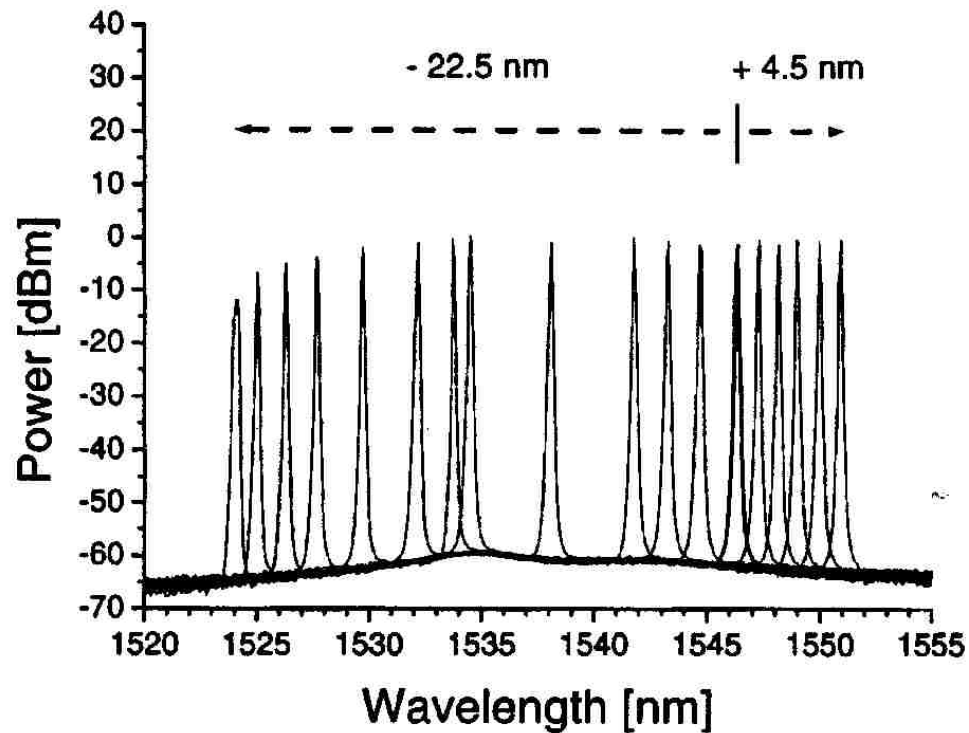


Fig. 3. 27-nm continuous tuning (22.5-nm compression + 4.5-nm extension) characteristics of 4-cm-long fiber DFB-laser.

**Кольцевой одночастотный волоконный лазер
с широкой перестройкой частоты
($\Delta\lambda = 40$ нм, $\lambda = 1522 - 1562$ нм, $\Delta\nu \sim 750$ Гц)**

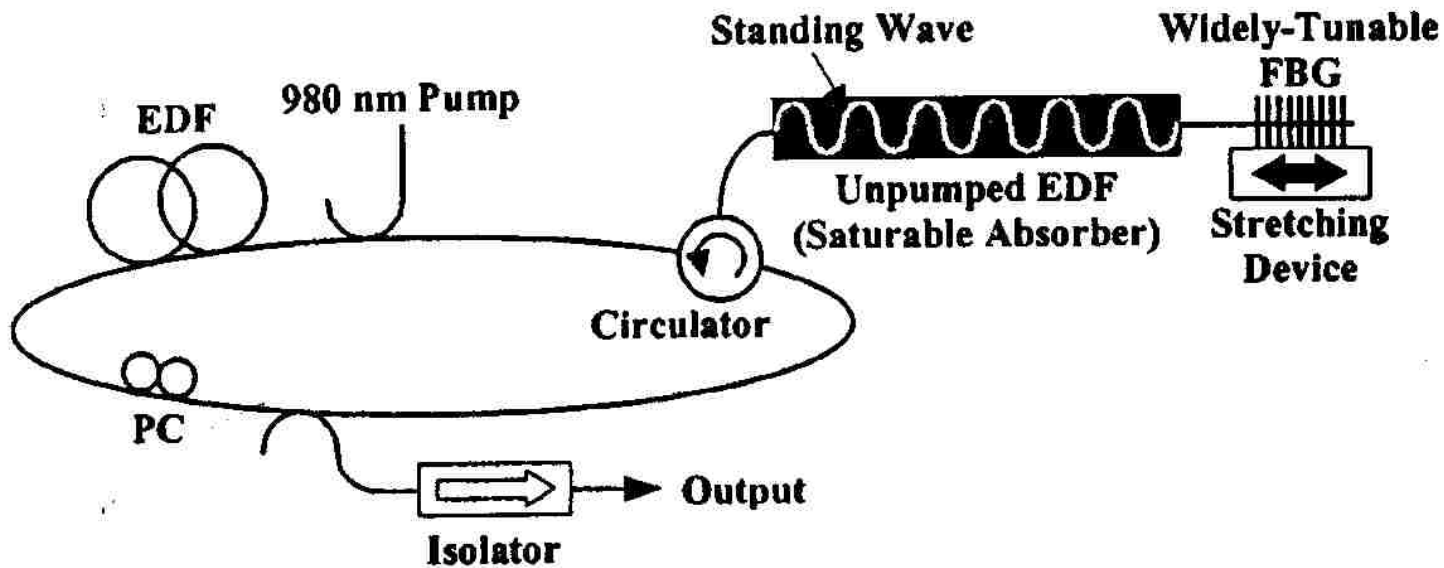


Fig. 1. Fiber ring laser configuration using a widely tunable FBG along with a saturable absorber to provide stable single-mode operation.

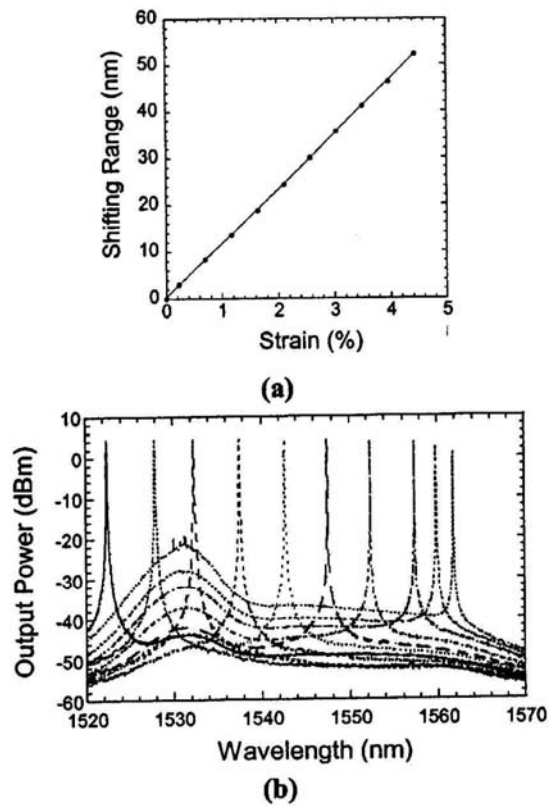


Fig. 2. (a) Measured tuning range of our widely tunable FBG. (b) Spectra of shifted laser output peaks with a 5% outcoupling fraction.

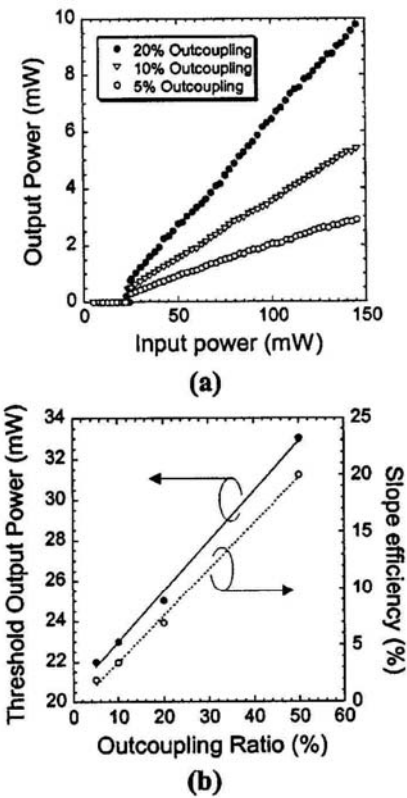


Fig. 3. (a) Lasing characteristics with various outcoupling ratios. Threshold output power and slope efficiency variations with outcoupling ratio.

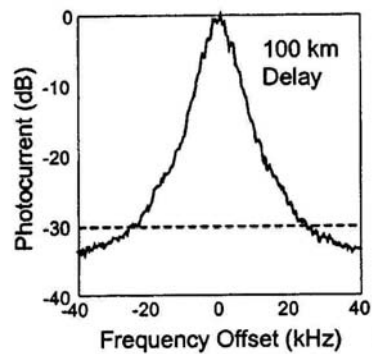
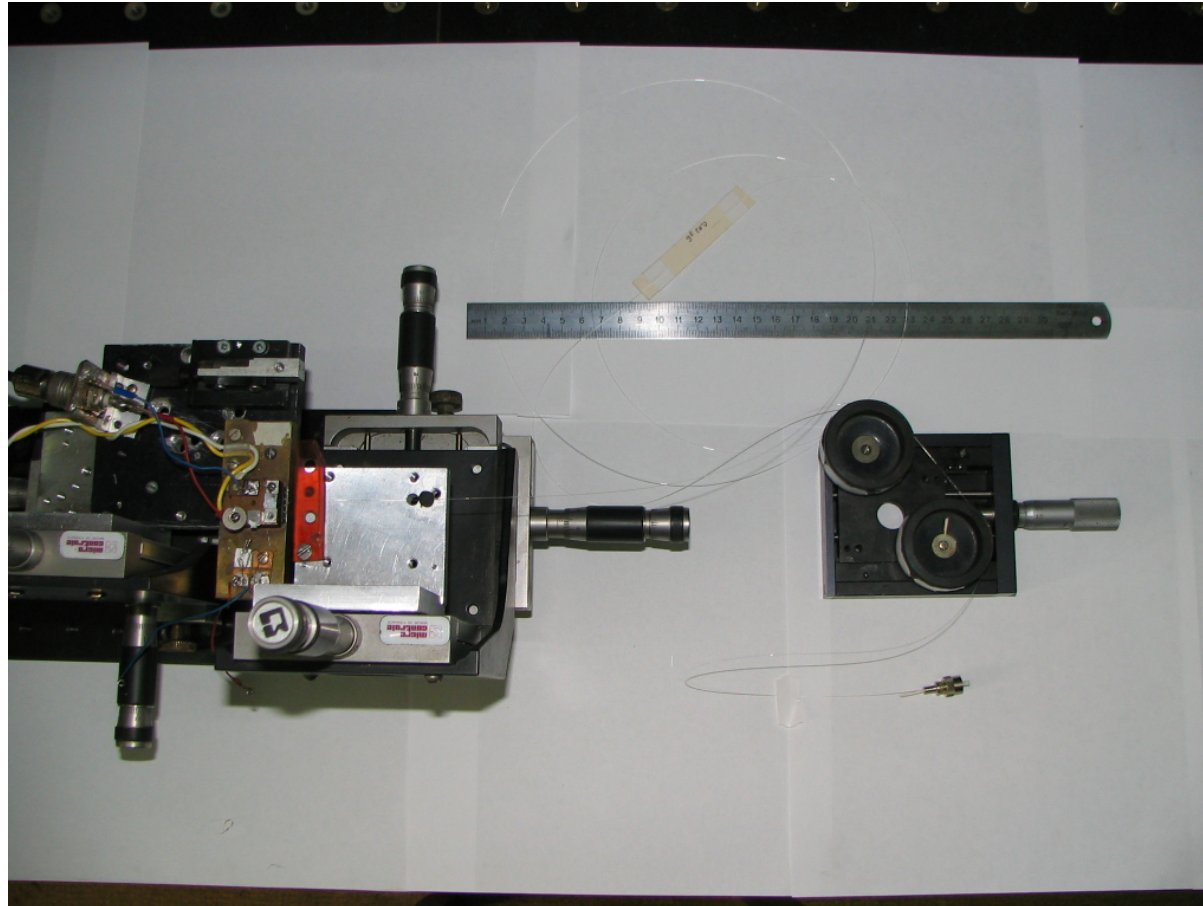
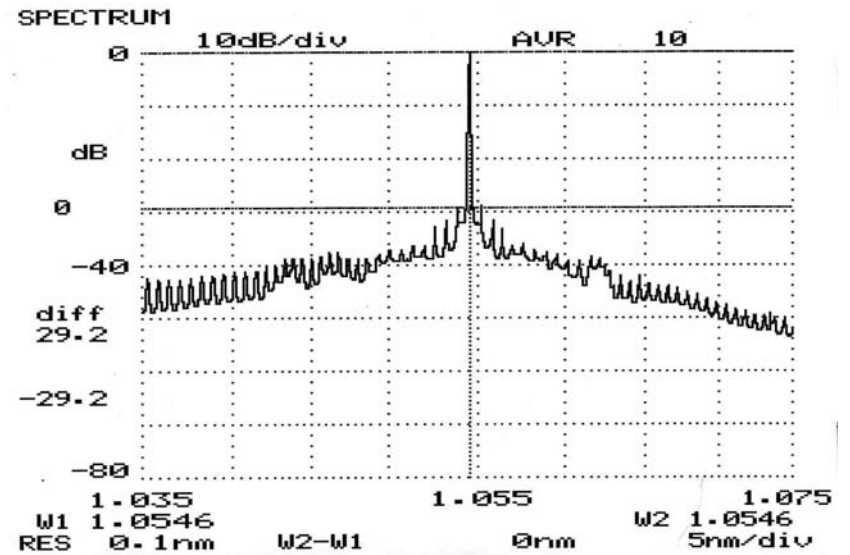
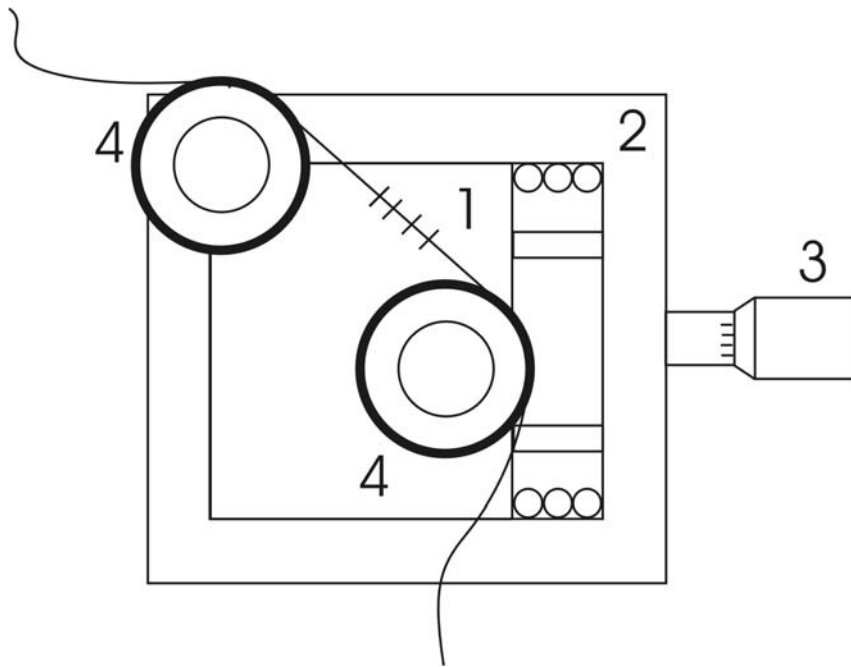


Fig. 5. Delayed self-heterodyne interferometer output power spectrum (100-km delay), indicating a linewidth of less than 1 kHz.

**Предварительные результаты НЦВО РАН
Лазер ФП + ВБР на $\lambda = 1,06$ мкм ,
перестройка на $\Delta\lambda \approx 4$ нм механическим растяжением ВБР**

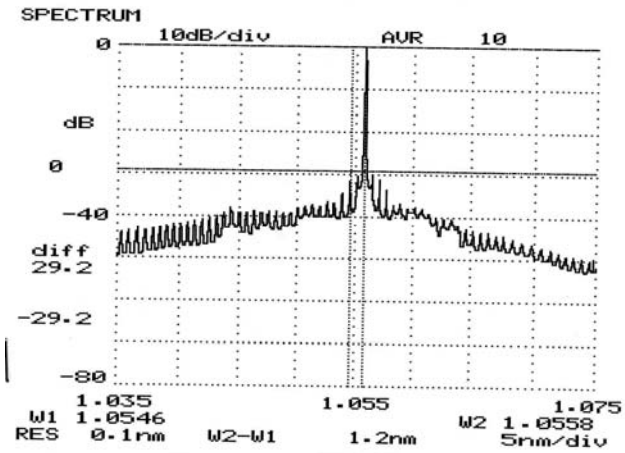


Общий вид макета опытного образца одночастотного перестраиваемого полупроводникового лазера (узел ввода в одномодовое волокно на трехкоординатном столике – слева) с волоконной брэгговской решеткой на механизме растяжения (справа) и волоконным выходом на FC – наконечнике.

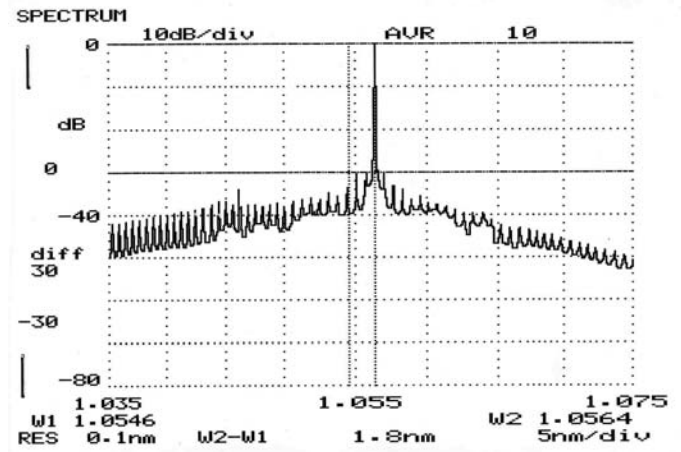


Устройство для растяжения
волоконной дифракционной решетки

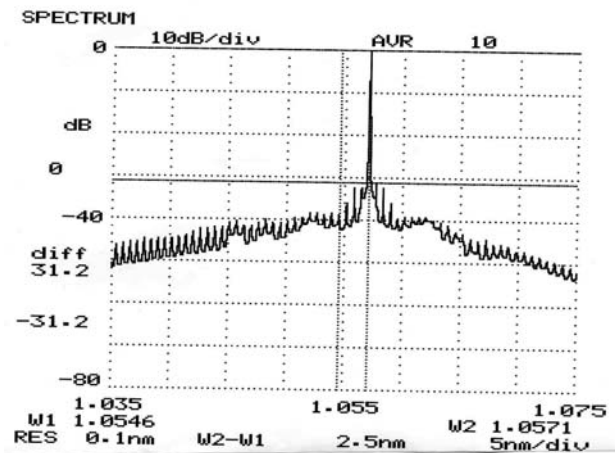
Смещение механизма растяжения:
 $\Delta L = 0$ мкм.



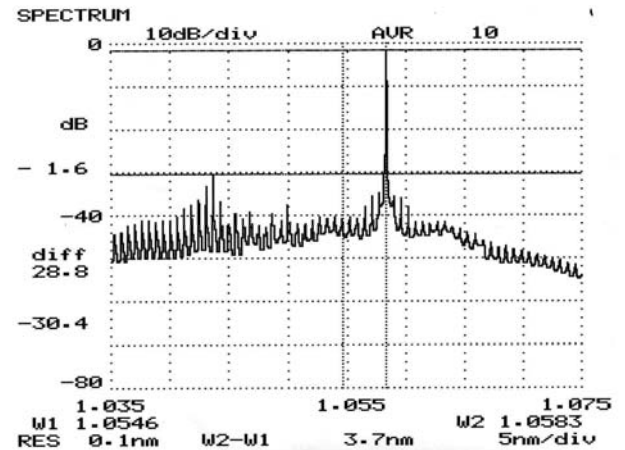
$\Delta L = 350 \text{ MKM}$



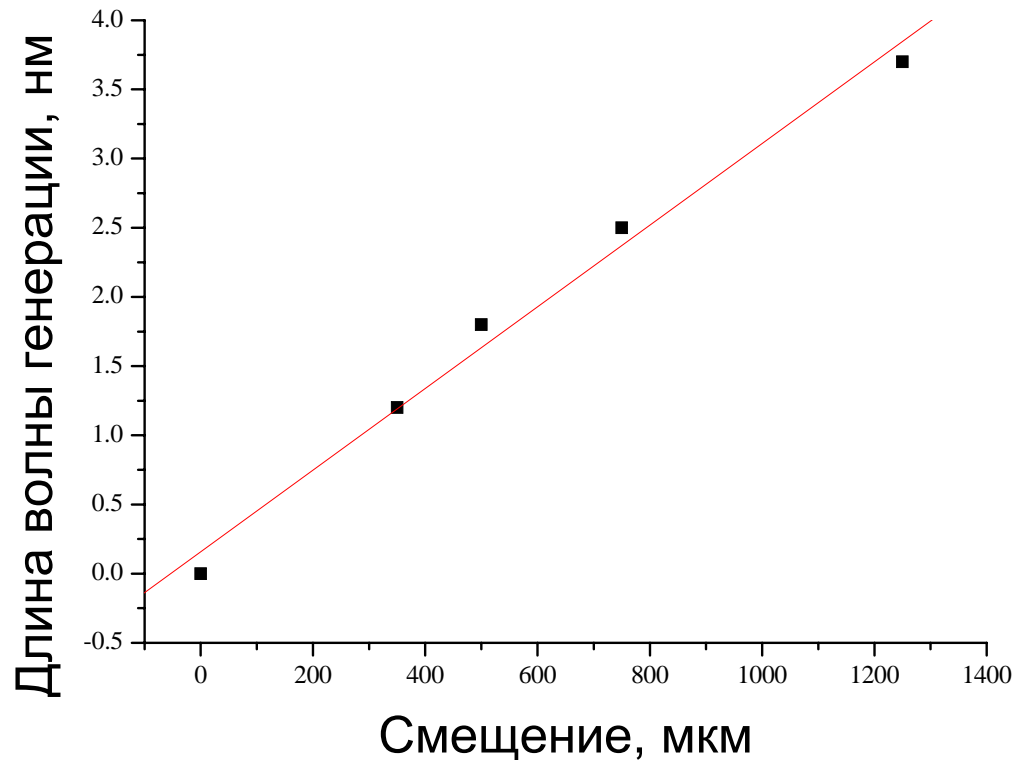
$\Delta L = 500 \text{ MKM}$



$\Delta L = 750 \text{ MKM}$



$\Delta L = 1250 \text{ MKM}$



Зависимость длины волны генерации от смещения ΔL устройства для растяжения волоконной брэгговской решетки в макете перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазера.

Перестройка растяжением ВБР составляет $\Delta\lambda \approx 4$ нм.

Длина волокна с ВБР, подвергнутая растяжению - 50 мм.
Величина растяжения $\Delta L \approx 1,3$ мм (2,6 % - безопасное растяжение).

4. Заключение.

Перспективные направления исследований и разработок для задач ДЛС по результатам данного обзора

- 1. Микроструктурированные (дырчатые) оптические волокна могут использоваться для проведения газоанализа в волоконной линии и образовывать квазираспределенные системы датчиков**
 - всасывание газа в дырки сердцевины и оболочки,**
 - большая длина взаимодействия излучения с газом,**
 - гибкость и удаленный доступ,**
 - сопрягаемость с перестраиваемыми одночастотными РОС- лазерами с волоконным выходом.**

- 2. В микроструктурированных оптических волокнах возможна генерация широкого спектра излучения – суперконтинуума и проведение газоанализа с высоким разрешением в самом дырчатом волокне (без использования перестраиваемых одночастотных диодных лазеров).**

- 3. Возможно создание компактных одночастотных волоконных и полупроводниковых лазеров с брэгговскими волоконными решетками и широкой перестройкой частоты генерации ~ 20 – 40 нм.**