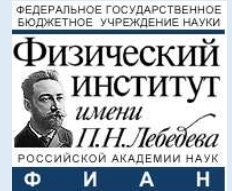


VTA WAVE



## Диодные лазеры для охлаждения атомов

В.В. Васильев, М.И. Васьковская, С.А. Зибров, С.С. Лосев, В.Л. Величанский

- А.В. Яровицкий, О.Н. Прудников, В.В. Васильев, В.Л. Величанский,
  - И.В. Шерстов, А. В. Тайченачев, В.И. Юдин
  - «Перестраиваемый и стабилизированный по частоте лазер для исследования динамики охлаждения атомов Rb в магнитооптической ловушке»,
    - *Квантовая Электроника* **34**, №4, (2004), 341-347.

# ПЛАН

**I** Требования

**II** Лазер-чип (в одном кристалле)

**III** Внешний резонатор («сильная» связь, мало проходов)

**IV** Внешний резонатор («слабая» связь, многопроходный резонатор)

**V** Внешний высокочастотный резонатор – (электронная обратная связь)

**VI** Гибридные варианты

**VII** Усиление

**VIII** Настройка и стабилизация длины волны

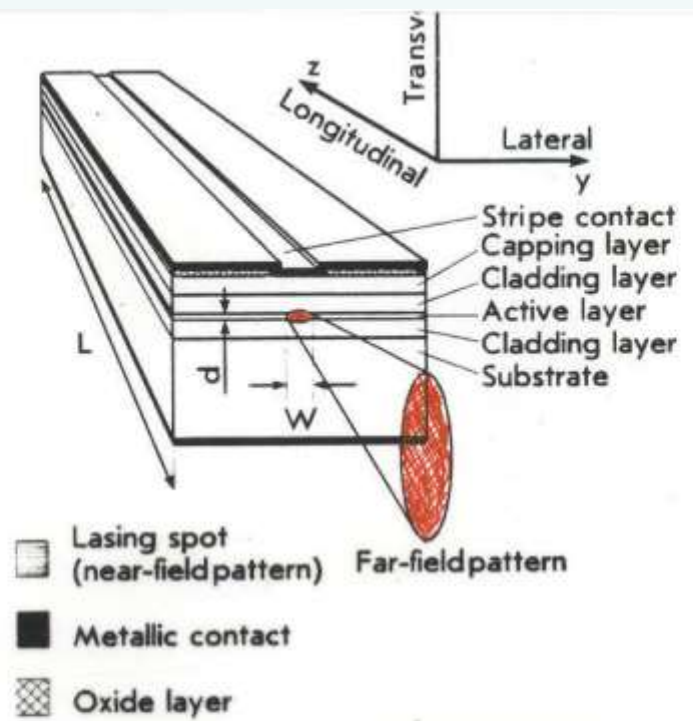
**IX** Еще немного физики

## **I ТРЕБОВАНИЯ**

- Мощность
- Ширина линии
- Настройка на требуемую длину волны
- Стабильность параметров

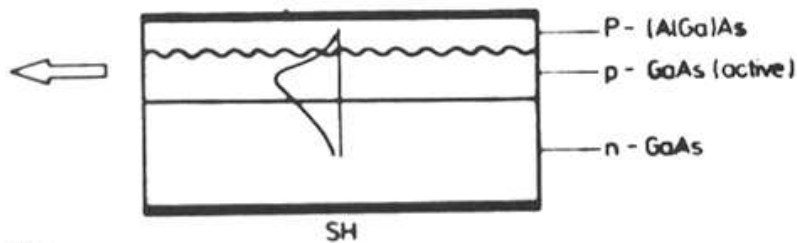
## II ЛАЗЕР-ЧИП (В ОДНОМ КРИСТАЛЛЕ)

- Обычный
- С волоконным выходом
- РБО
- Многосекционный

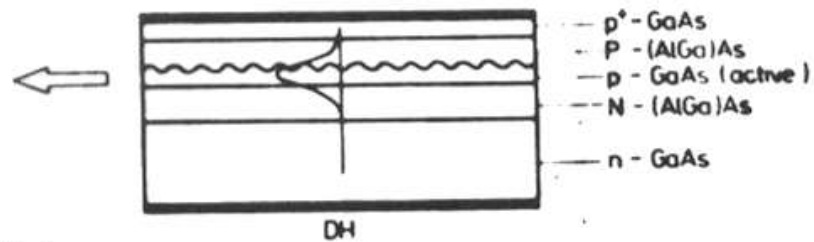


Typical structure of double heterostructure diode laser.

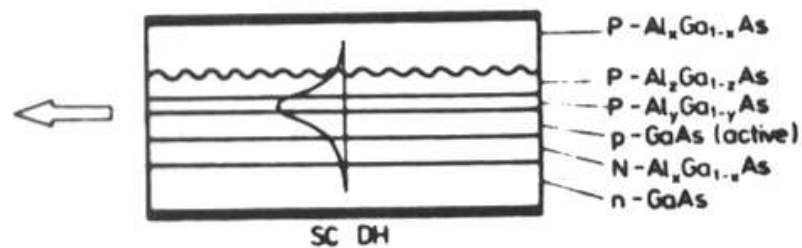
(a)



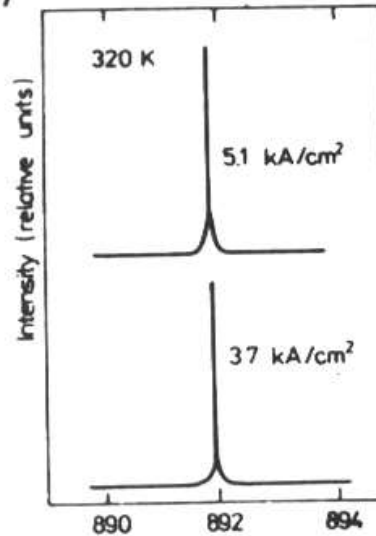
(b)



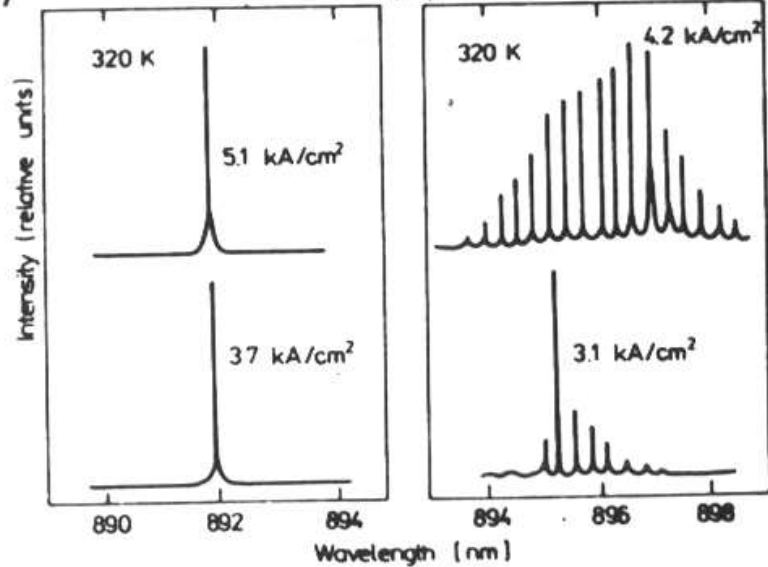
(c)



(a)



(b)



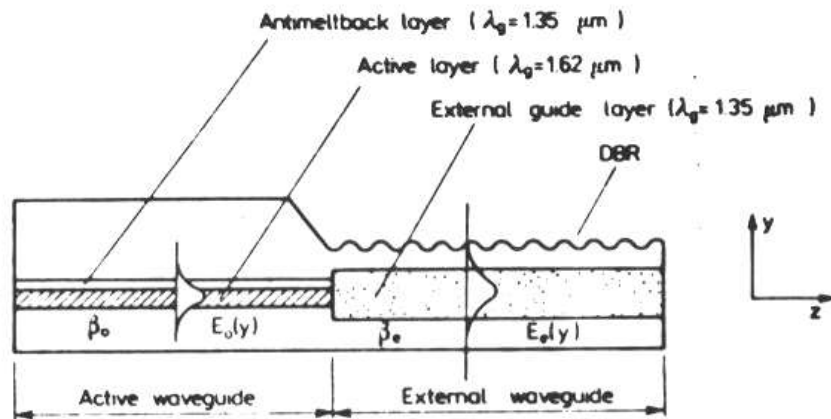


Fig. 6.14. Schematic representation of a GaInAsP/InP BJB-DBR integrated laser (Abe *et al.*, 1981).

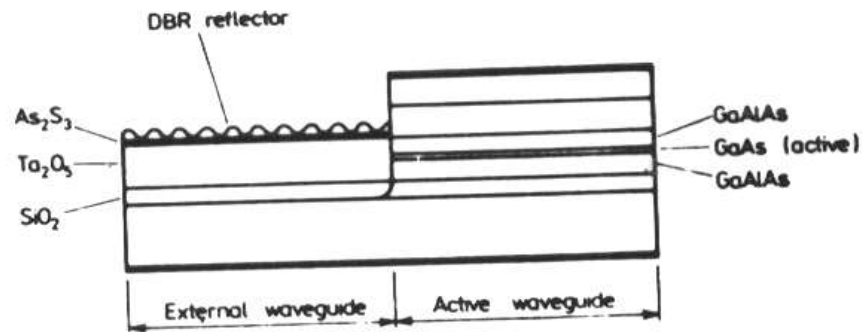


Fig. 6.15. Schematic representation of an AlGaAs/GaAs, MIH DBR laser (Alferow *et al.*, 1987).

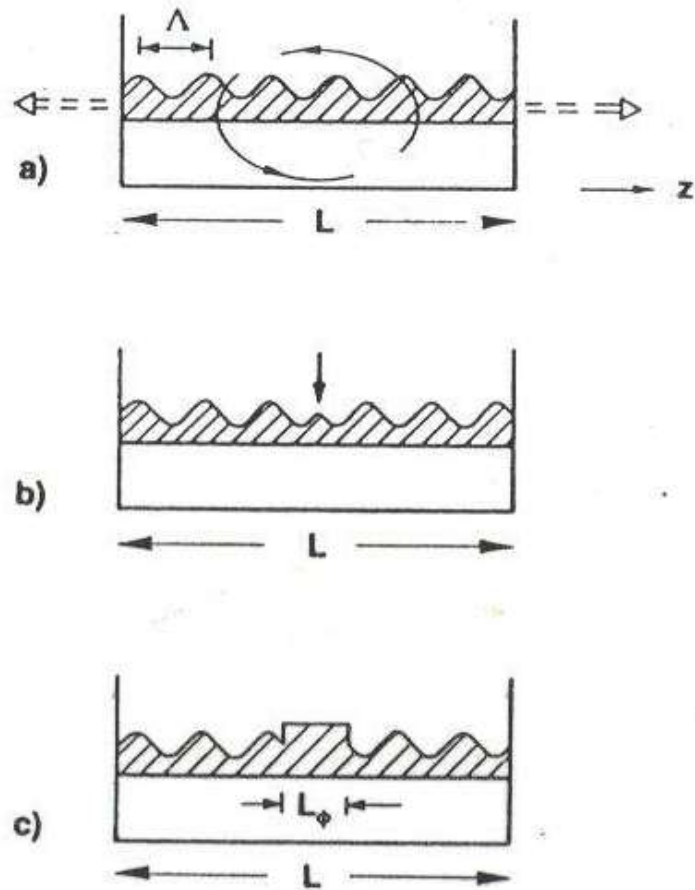
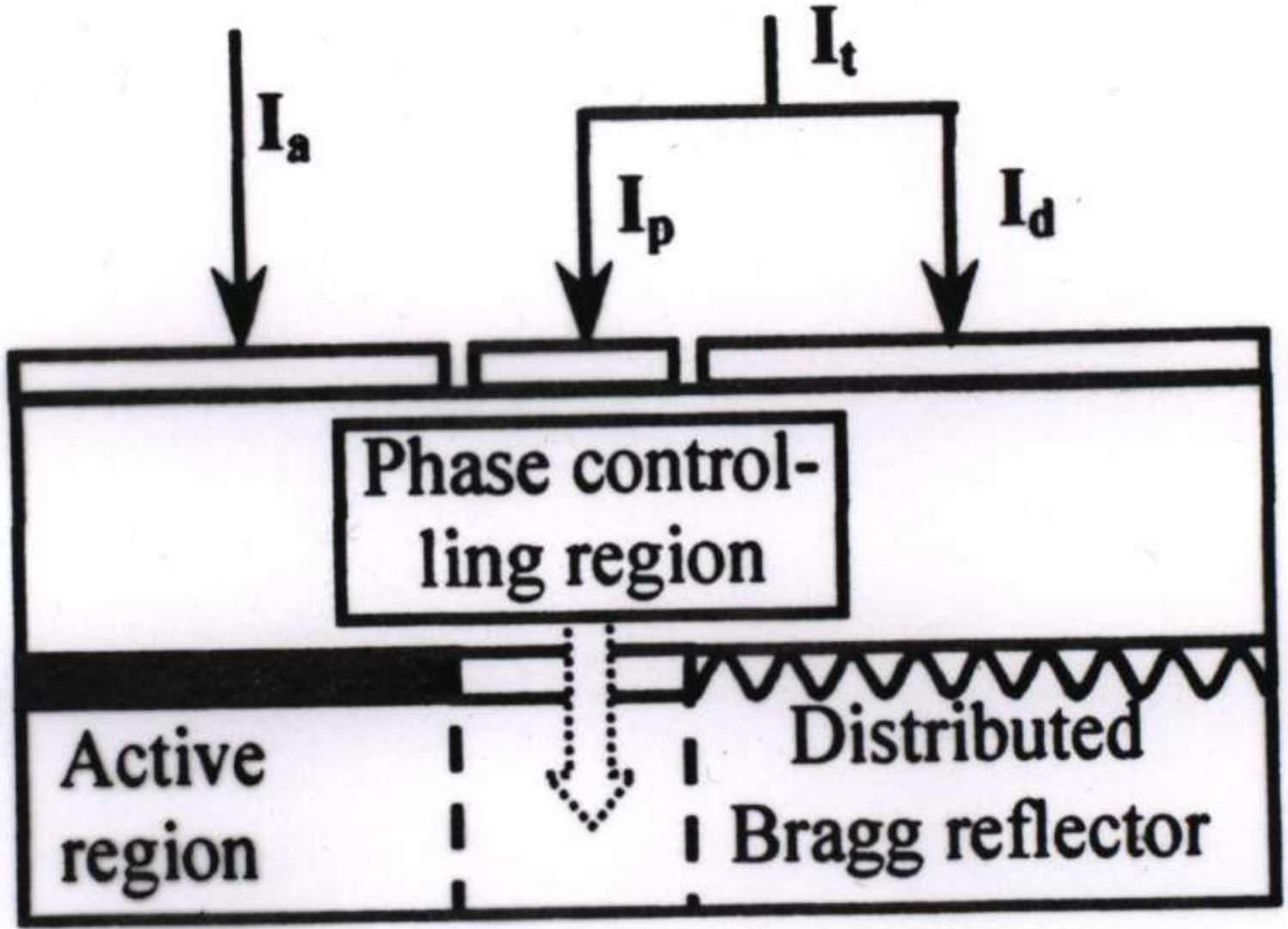


Fig. 2.24. DFB laser structures: (a) without phase adjustment; (b) phase-shifted DFB laser; (c) DFB laser with phase adjustment region.





### III Внешний резонатор («сильная» связь, мало проходов)

- Ширина линии генерации
- Литман, Литтров
- Решетка
- Интерференционный фильтр
- Призмы, эталоны
- Лазеры VitaWave
- Автоюстировка

$$\Delta\nu_{D.L.} = \frac{\pi h \nu \gamma^2 n_{sp} (1 + \alpha^2)}{P}$$

$$\gamma = \frac{c}{2\pi n^* l} \cdot (\alpha^* l - \ln R)$$

$$\alpha = \frac{(dn/dN_e)}{(dg/dN_e)}$$

$$n_{sp} = \frac{K}{\left[ 1 - \exp\left(\frac{h\nu - \Delta F}{kT}\right) \right]}$$

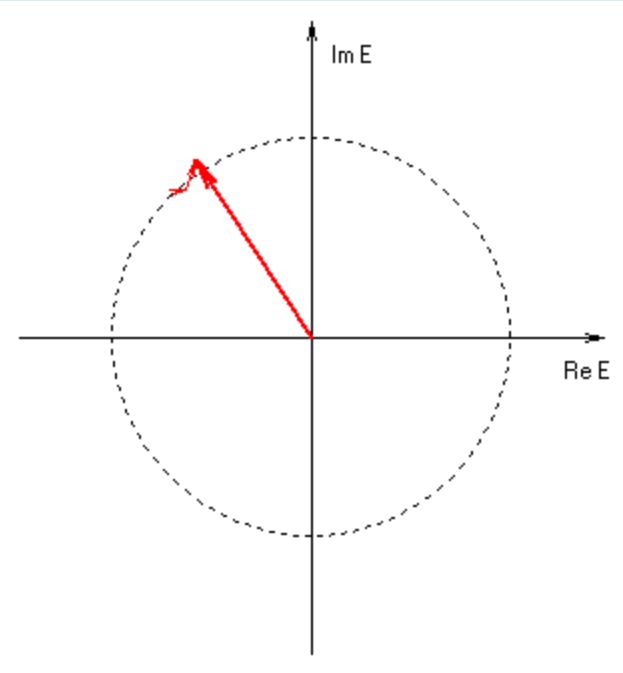
$$\Delta F = F_c - F_v$$

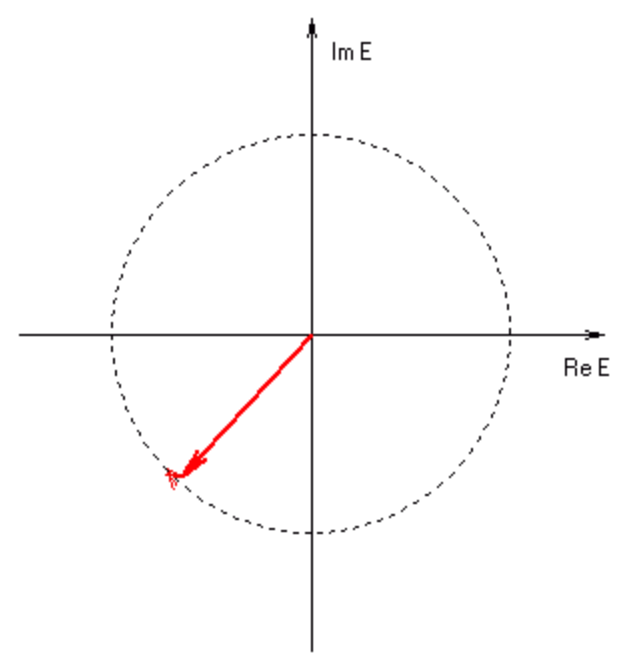
# Методы уменьшения ШЛГ диодных лазеров

- ВНУТРЕННИЕ РЕЗЕРВЫ
- Подавление технических флуктуаций
- Подавление соседних продольных и поперечных мод
- Уменьшение параметра  $\alpha$
- Уменьшение внутренних потерь
- Увеличение длины резонатора (устойчивость ОЧГ падает)
- Увеличение длины резонатора + РОС или РБО
- Увеличение мощности генерации током накачки
- Уменьшение фактора спонтанного шума

## ВНЕШНИЕ РЕСУРСЫ

- Сильная оптическая обратная связь в малодобротном резонаторе
- Слабая оптическая обратная связь с высокодобротным резонатором
- Оптическая (некогерентная) обратная связь
- Электронная (быстрая) обратная связь (ЭОС)
- Фазовый захват полем другого лазера (ЭОС)
- Передача когерентности от другого лазера («Injection locking»)





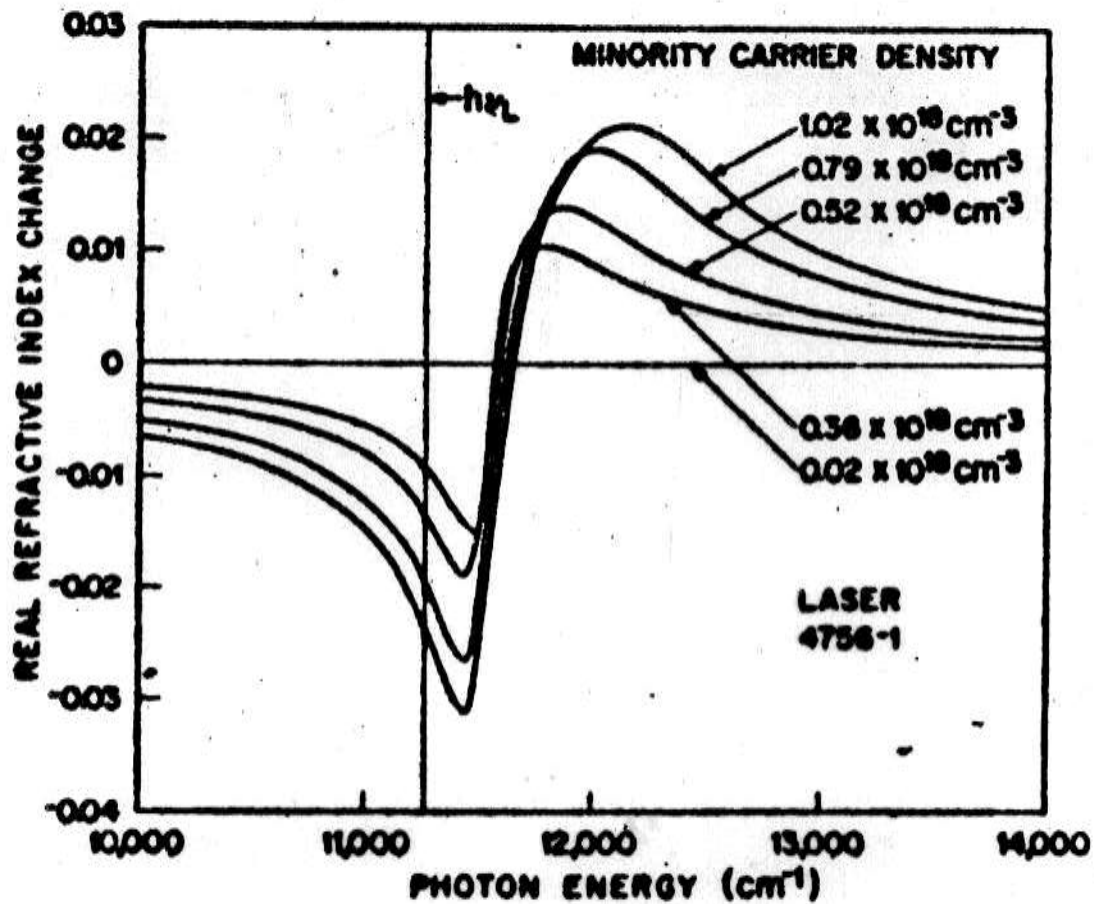
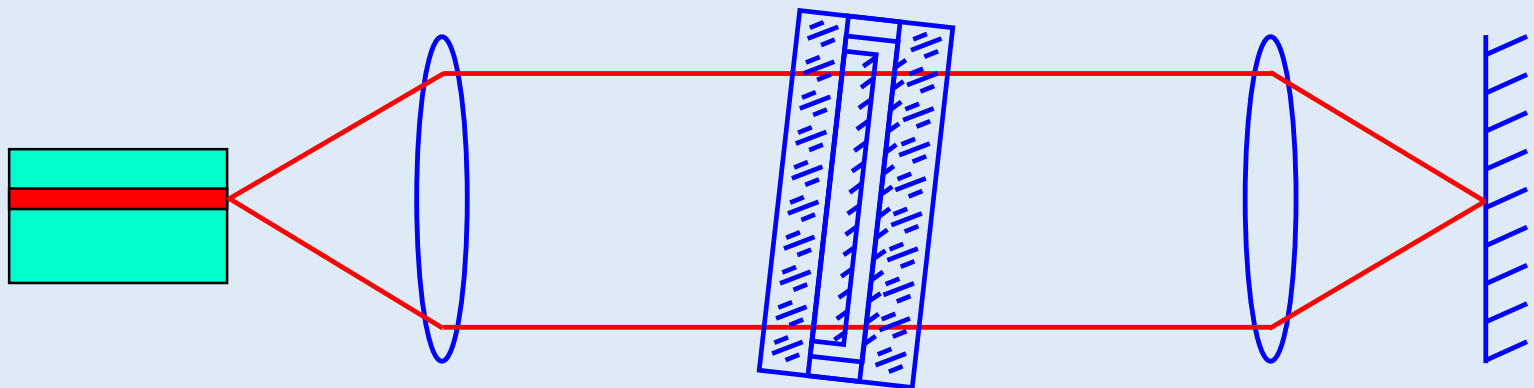
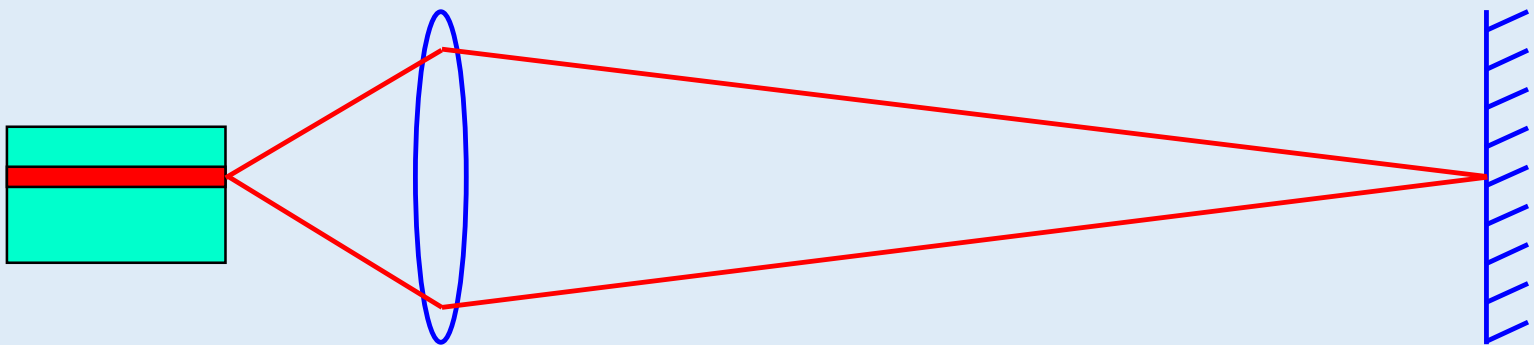
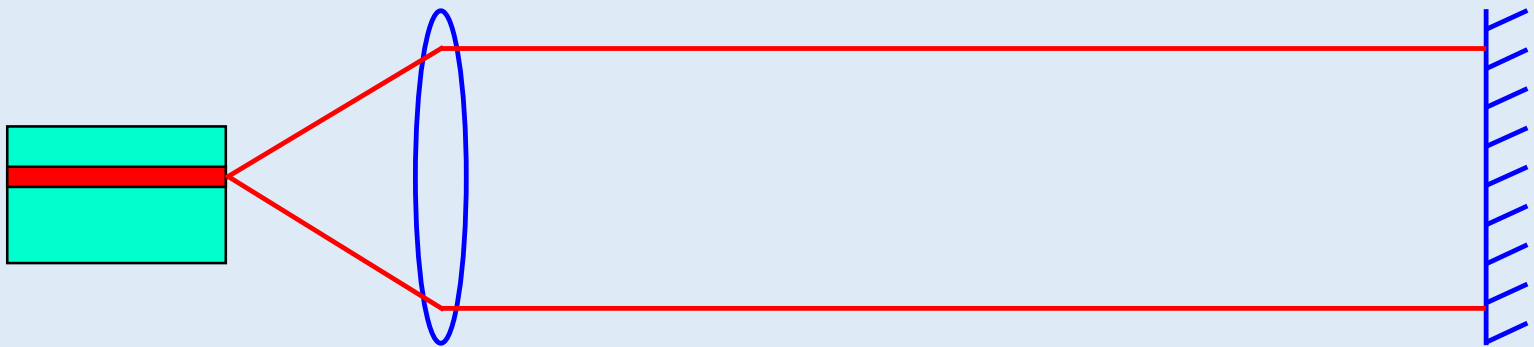


FIG. 4. Real change of the refractive index in GaAs vs photon energy.





## Minimum line width of an injection laser

V. L. Velichanskii, A. S. Zibrov, V. S. Kargopol'tsev, V. I. Molochev, V. V. Nikitin,  
V. A. Sautenkov, G. G. Kharisov, and D. A. Tyurikov

P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences of the USSR, Moscow

(Submitted June 7, 1978)

Pis'ma Zh. Tekh. Fiz. 4, 1067-1090 (September 26, 1978)

PACS numbers: 42.55.Ps

The lower limit on the line width ( $\Gamma$ ) of a semiconductor laser in a single-frequency operation is set by the quantum noise<sup>1</sup>:

$$\Gamma = \pi \Delta \lambda^2 f^2 / P, \quad (1)$$

where  $\gamma$  is the cavity line width and  $P$  is the output power. Because of the low  $Q$  values of semiconductor lasers, the width  $\Gamma$  is comparatively large<sup>2</sup> and restricts the applications of such lasers. A much narrower line can be achieved if  $\gamma$  is reduced. In the present letter we report an experimental confirmation of this idea.

The width of the output line of a semiconductor laser has been measured with high resolution in a few cases. Hinkley and Freed<sup>3</sup> carried out such measurements on the basis of the beat spectrum produced by a semiconductor laser and a CO<sub>2</sub> laser, but this approach is only feasible for certain kinds of lasers. It is simpler to use beats between longitudinal modes for the measurements,<sup>3</sup> but steady-state multimode output may not be realized in a homogeneous active medium.<sup>4</sup> The use of a Michelson interferometer<sup>5</sup> with a baseline  $> 1$  km suffers from technical difficulties. In the present work, for the first time the width of the output line has been measured using beats between two tunable semiconductor lasers. The  $Q$  of the cavity is increased by external feedback.

### Characteristics of the tunable lasers.

The semiconductor laser with unbrightened faces, a stripe contact, and a double Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As heterostructure (1 in Fig. 1) operates continuously (at 77°K) in the wavelength range 8080-8150 Å. The length of the "internal" cavity of the laser diode  $l = 250 \mu$ . The total length of the "external" cavity (mirrors 5-7) is  $L = 1$  m. Objective lenses 2 on the active regions with the passive region, which includes a Fabry-Perot interferometer 3 with a baseline  $d = 5 \cdot 10^{-3}$  cm and an etalon 4 with  $d = 2$  cm. The two objective lenses in the cavity increase the output stability. The Fabry-Perot interferometer 3 selects one of the modes of the internal cavity in an interval of 30 Å. The modes of the external cavity are changed by rotating etalon 4. The output frequency of laser B is tuned continuously over an interval  $\sim 100$  MHz by shifting mirror 6. With synchronous modulation of the injection current and the length  $L$  without etalon 4 in the cavity the range of continuous tuning is 2.5 GHz. The number of modes of the external cavity is monitored with Fabry-Perot interferometer 12, with a resolution of 150 MHz ( $d = 10$  cm). When the current is raised a single external mode is excited in all the laser diodes, as long as the selective elements ensure lasing at one resonance of the internal cavity. The ratio of the threshold currents with and without external feedback  $K = 1.1-1.15$ ; the output power is 0.5-5 mW; and the threshold currents are 50-100 mA. The working cur-

rents are higher than the threshold currents by a factor of 1.1-1.4.

**Observation of the beat signal.** The beams from lasers A and B are brought into coincidence by objective lenses 8 and mirror system 9 and directed to photodiode 14. If the angle between the beams satisfies  $\epsilon \leq 10^{-4}$  rad, the diffraction grating makes it possible to monitor the difference between the laser frequencies within an error of 5 GHz. In the course of the search, an alternating voltage is applied to the piezoelectric ceramic, and the angular position of the etalon and the injection current are varied. When beats appear the alternating voltage is removed and the signal is studied with a 54-27 spectrum analyzer at frequencies in the range 300-300 MHz. Continuous observation is carried out for several minutes, for a time governed by mode switching in the external cavity. If the external mode does not jump the drift rate of the beat frequency varies over the range 2-20 MHz/sec; this determines the band covered (5-100 MHz) and the resolution (50 kHz).

**Experimental results.** The width of the beat spectrum for the lasers with the external cavities is less than 100 kHz at power levels of 1 and 0.7 mW. This spectral width is governed by the width of the laser line and the analyzer resolution, so that the widths of the laser lines are 50-70 kHz. In the operation of one of the lasers without the external feedback the width of the beat spectrum reaches 300 MHz and is governed by the corresponding line width. Let us compare the measured values with the minimum possible width  $\Gamma$ . For the internal resonator,  $\Gamma = 2$  MHz [ $\gamma_1 = \Delta \nu_{ax}(\alpha l - \ln R_0/x$  (Ref. 6), with  $\alpha = 10$  cm<sup>-1</sup> and  $R = 0.32$ ]. For the external cavity, for the same power, 1 mW, we have  $\Gamma = 0.5-2$  kHz [an estimate of the width of the cavity line for  $(l/L) \ll R_0 \ll 1$  yields  $\gamma_{ex} = \gamma_1 l (L R_0)^{-1} = (30-60) \gamma_1$ , where  $R_0$ , the fraction of the intensity returned from the external cavity, is esti-

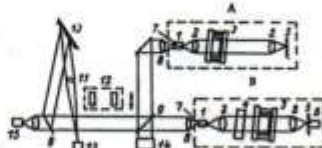
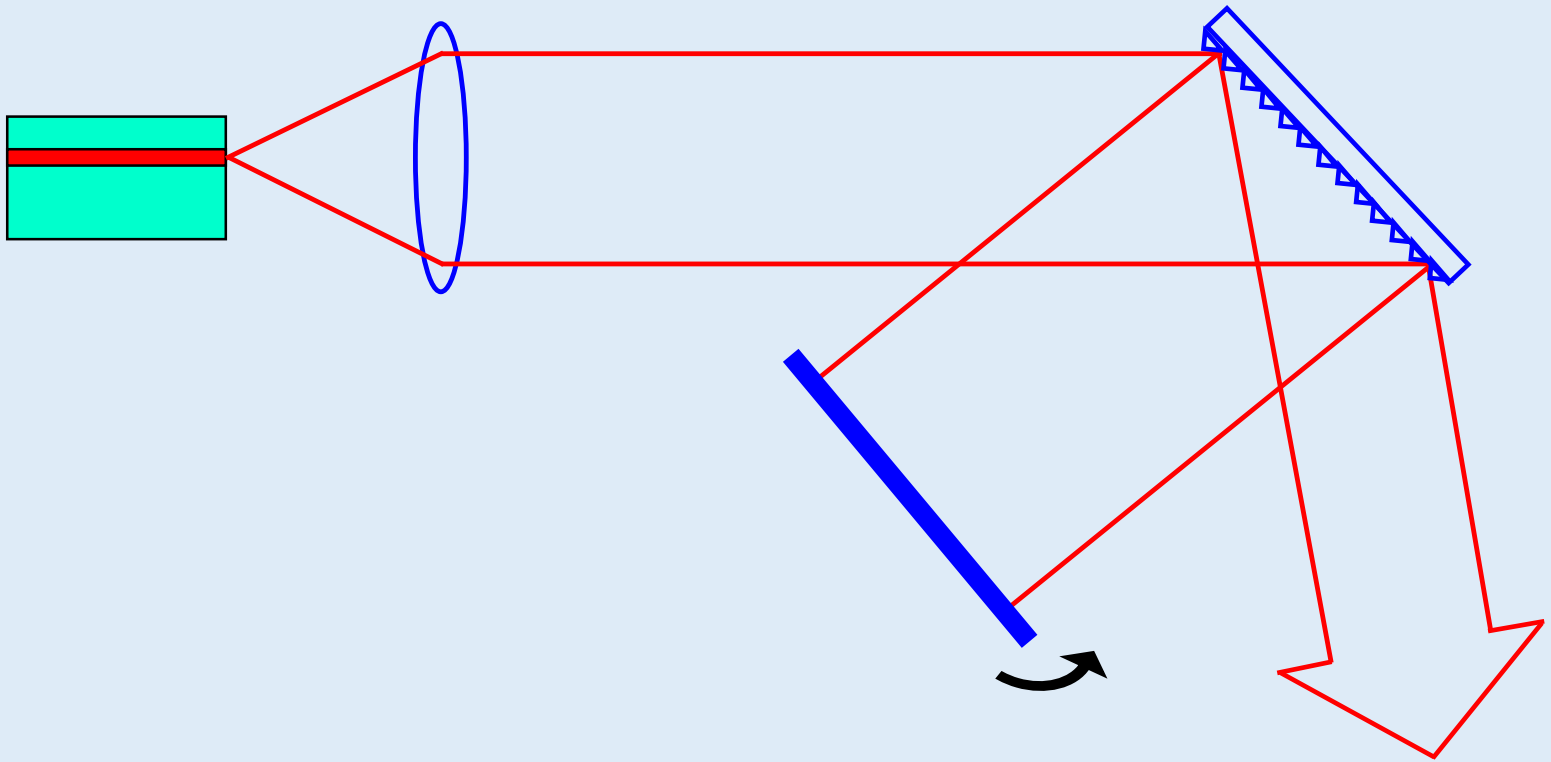
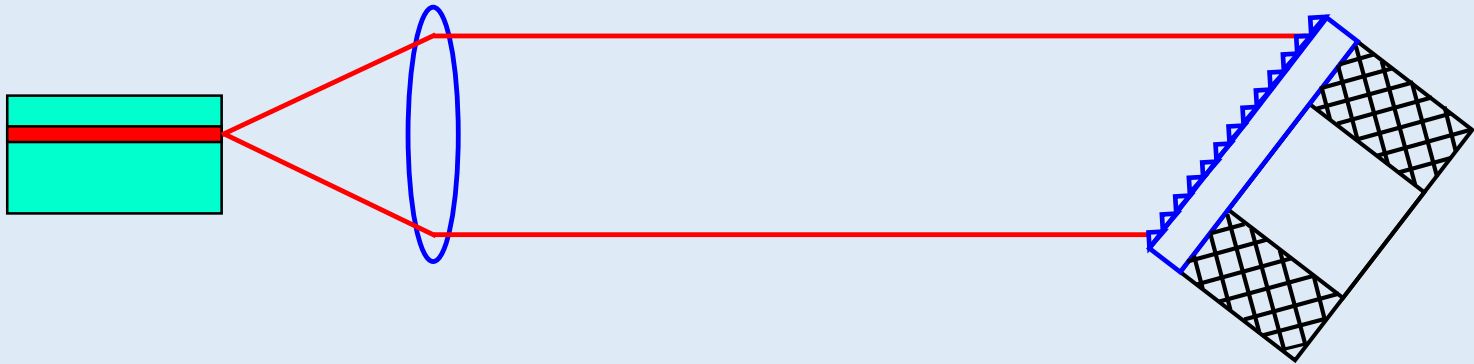
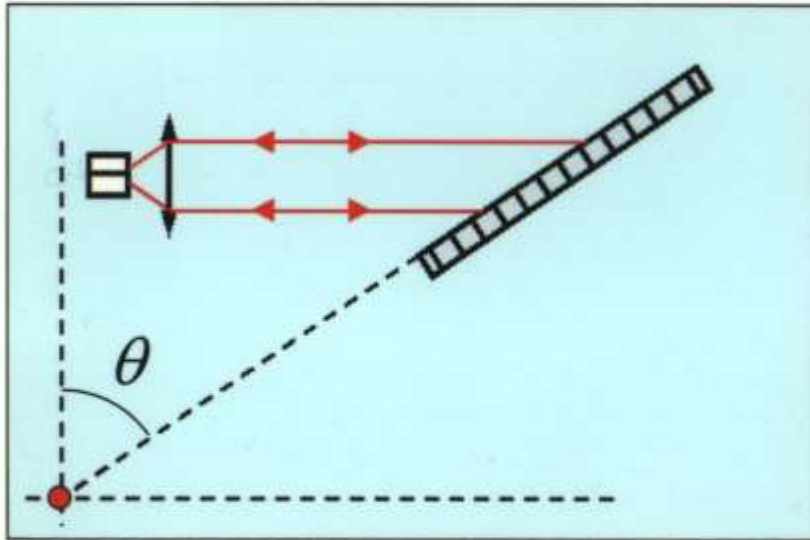


FIG. 1. A, B) Lasers with an external cavity; 1) laser diodes; 2) objective lenses; 3, 4) selective elements; 5) external mirrors; 6) piezoelectric ceramic; 7) output mirror; 8) collimating objective lens; 9) semitransparent mirror; 10) diffraction grating; 11) objective lens with a long focal length; 12) Fabry-Perot interferometer; 13) image converter; 14) fast-response photodiode; 15) power meter.



## II. Непрерывная перестройка частоты в широком диапазоне.



Теория: Nilsson O.,... *Proc.ECOC 90*,  
Amsterdam, 373 (1990).

Эксперимент: De Labachellerie M., ..  
*Applied Optics*, 32, 269 (1993)  
 $\Delta\nu = 2000$  ГГц

Общее решение для разных типов  
селективных резонаторов:

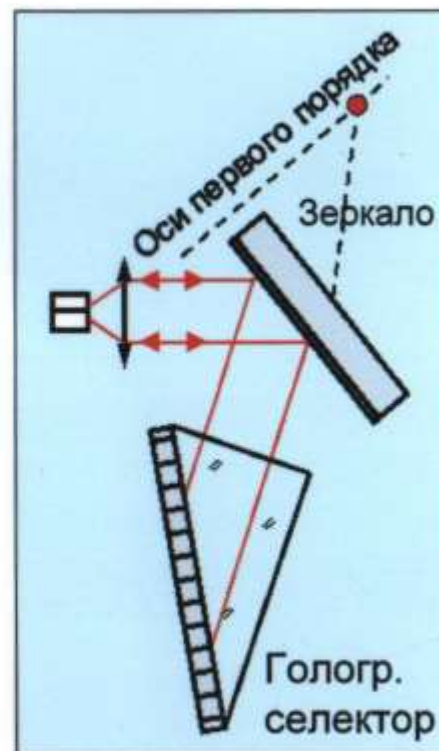
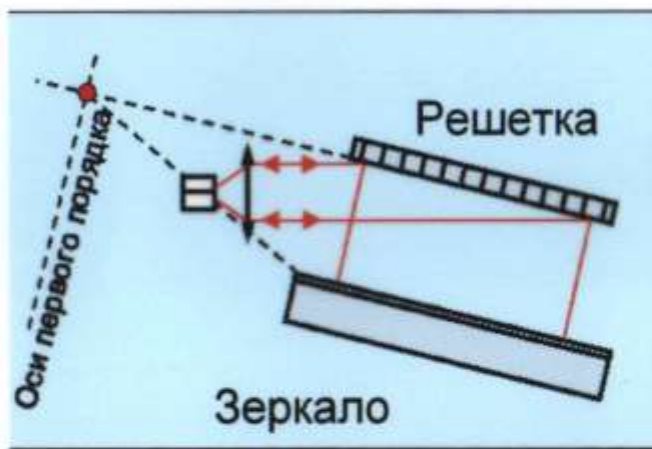
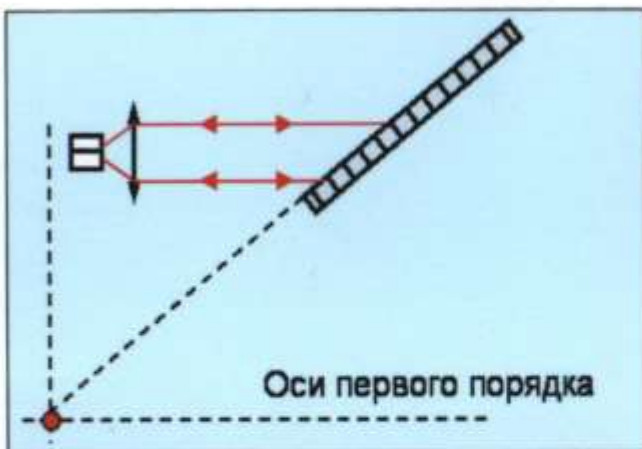
В.Л.Величанский, А.В.Яровицкий  
*КЭ*, 22(8) (1995) 796

Расстройка:  $F(\theta, x, y) = \lambda_q(\theta, x, y) - \lambda_r(\theta)$

$$\Delta F(\theta_0, \Delta\theta_{max}, x, y) = \cancel{c_1(\theta_0, x, y)} \Delta\theta + \cancel{c_2(\theta_0, x, y)} \Delta\theta^2 + c_3(\theta_0, x, y) \Delta\theta^3 + o(\Delta\theta^4)$$

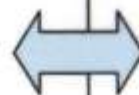


# Расчет для некоторых часто употребляемых схем внешних селективных резонаторов.



## Выводы:

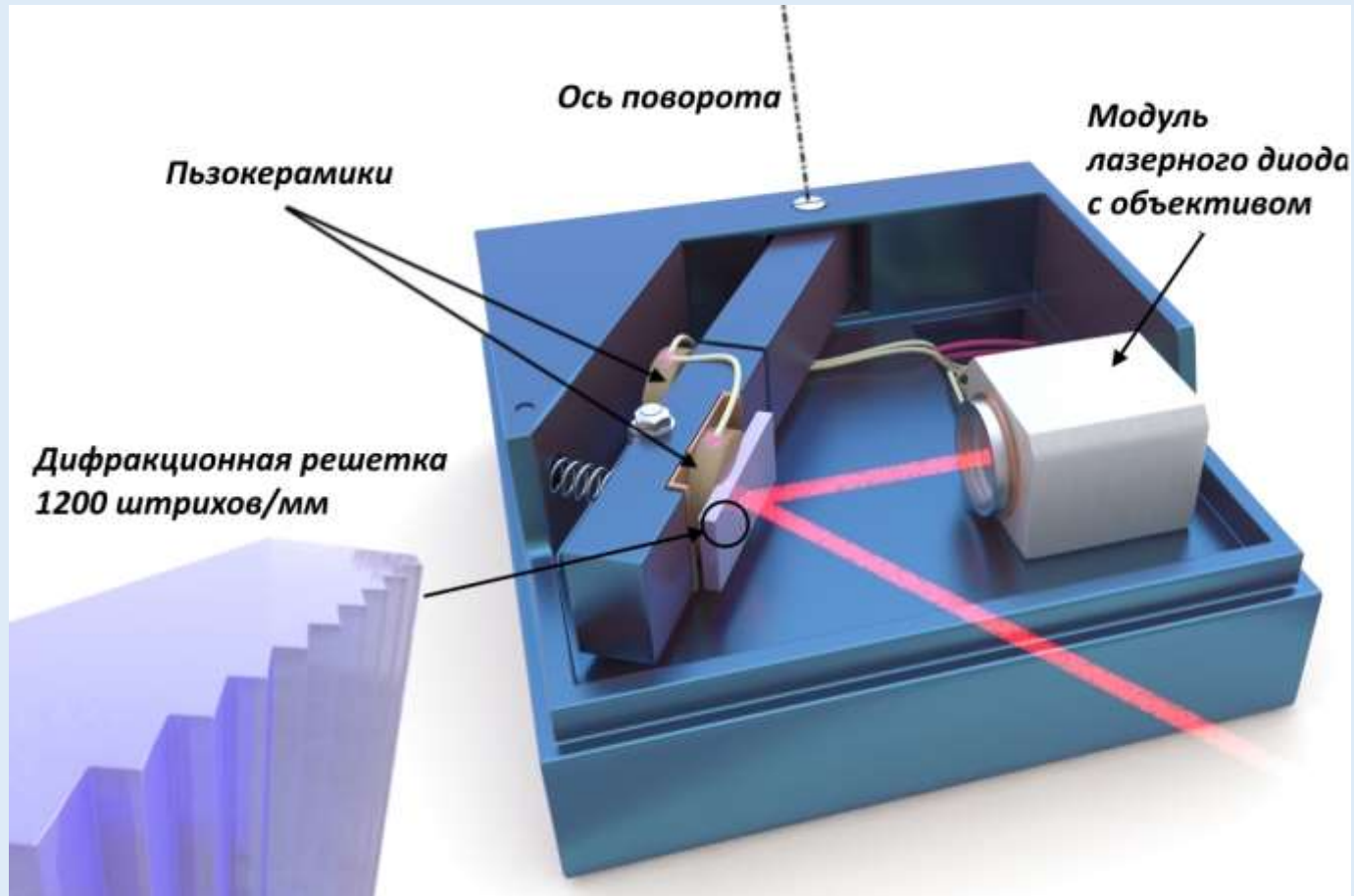
1. **Непрерывная перестройка** при чистом вращении селективного элемента позволяет перестраивать частоту инжекционного лазера с внешним резонатором **в пределах всей линии усиления** полупроводниковой среды.
2. Диапазон непрерывной перестройки быстро сокращается, при смещении оси вращения с прямой «первого порядка».



Чувствительность к положению оси:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\text{Поперек ПП}}{\text{Вдоль ПП}}$$

- *Review of Scientific Instruments*, **77**, №1, (2006), 013102-1-4.
- V.Vassiliev, S.Zibrov, V.Velichansky, “A compact extended cavity diode laser for atomic spectroscopy and metrology”,





Длина волны **423 633, 638, 769, 780, 795, 808, 842, 852, 895, 1315** нм

Ширина линии **< 1 MHz**

Мощность **10 mW**

Диапазон непрерывной перестройки

Только PZT **>6 GHz**

PZT и ток накачки **>30 GHz**

Грубый диапазон перестройки **2nm**

США - 40 шт.; Россия > 100шт **V.V.Vassiliev:** [vvv@okb.lpi.troit](mailto:vvv@okb.lpi.troit)

остальное 35 **S.A. Zibrov**

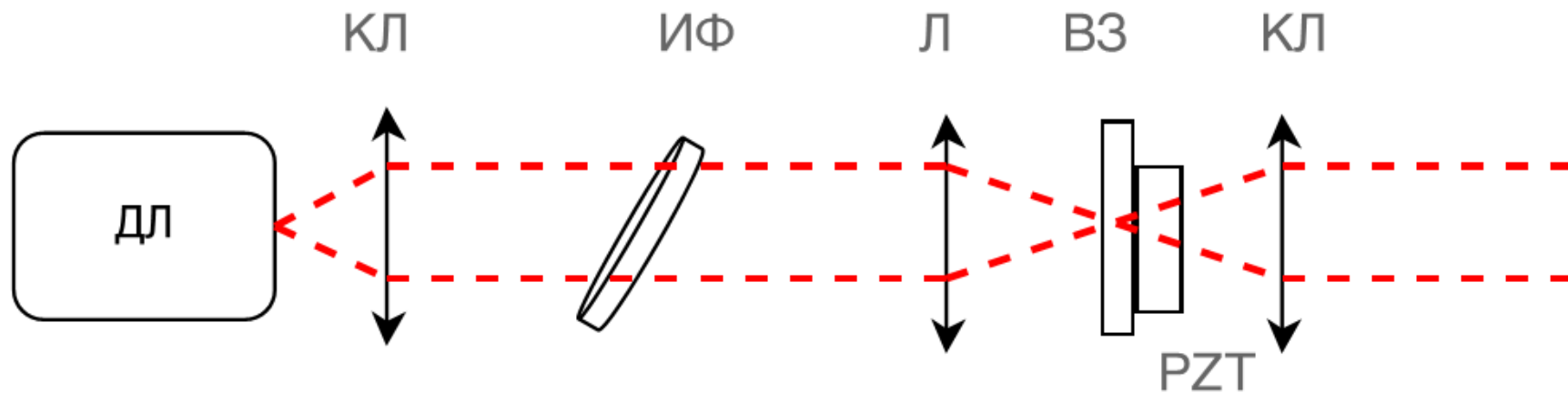


Схема лазера с внешним резонатором с ИФ: ДЛ — диодный лазер НИИ  
 Полюс; КЛ — коллимирующая линза; ИФ — интерференционный фильтр;  
 Л — линза, образующая «кошачий глаз» с выходным зеркалом ВЗ; PZT —  
 пьезокерамика.



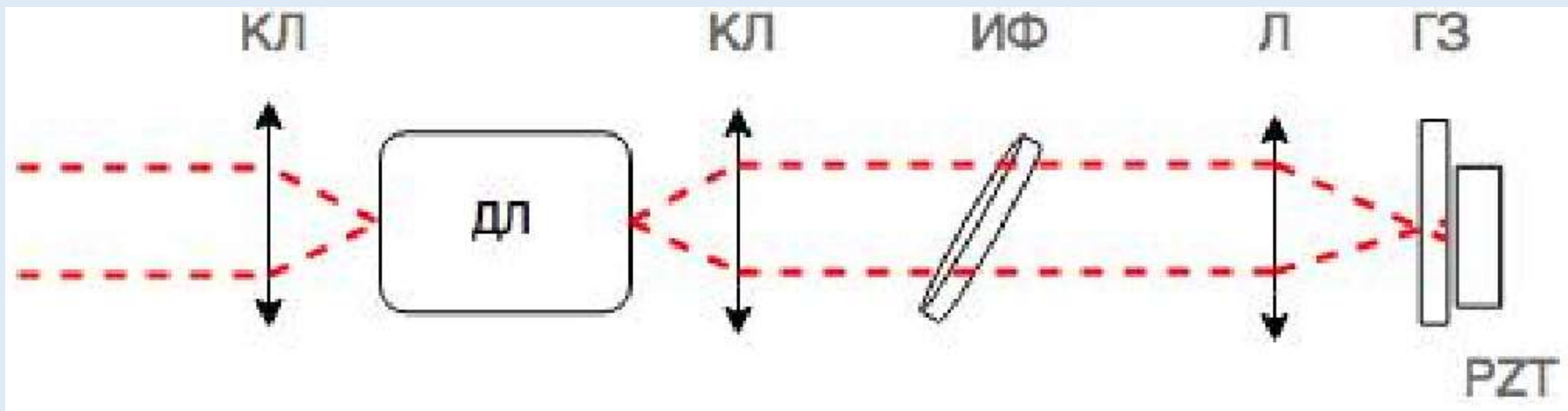
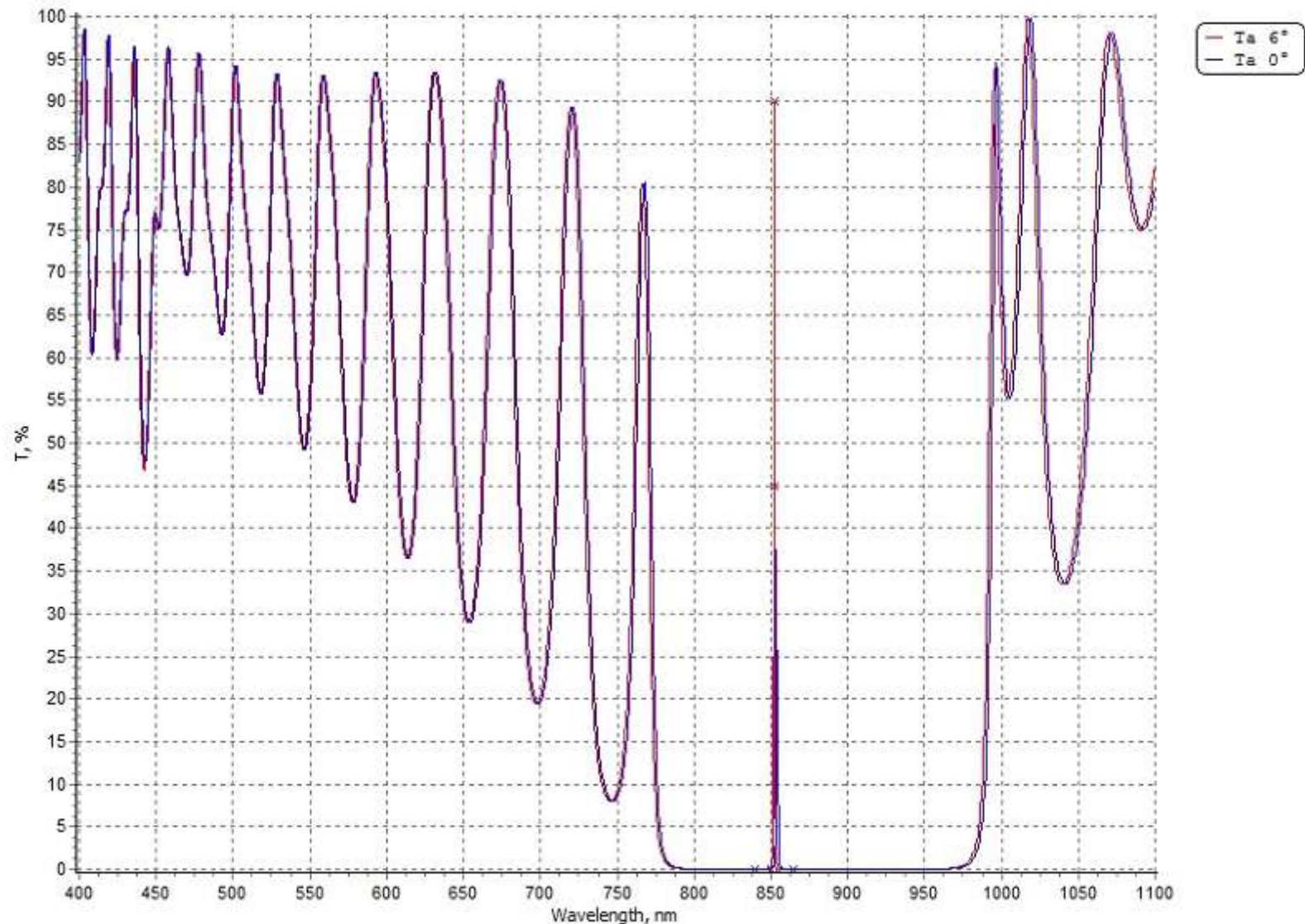
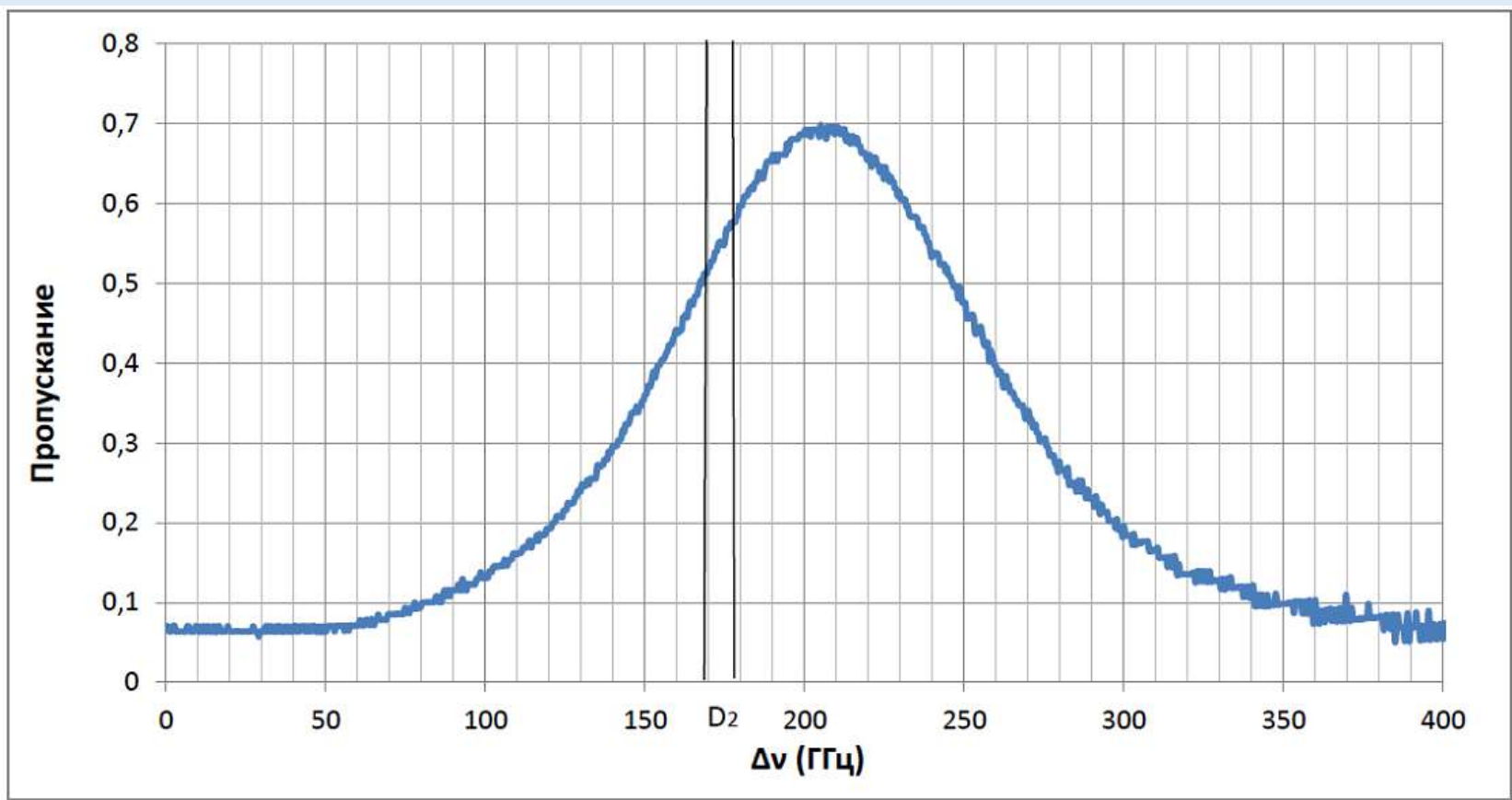


Схема внешнего резонатора. ДЛ — диодный лазер Sacher Lasertechnik SAL2-0850-100; КЛ — коллимирующая линза; ИФ — интерференционный фильтр; Л — линза, образующая «кошачий глаз» с глухим зеркалом ГЗ; PZT — пьезокерамика.



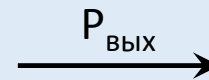
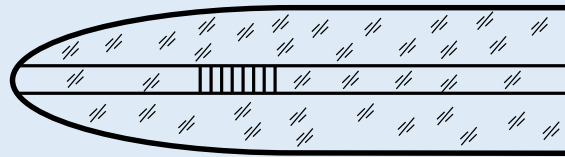
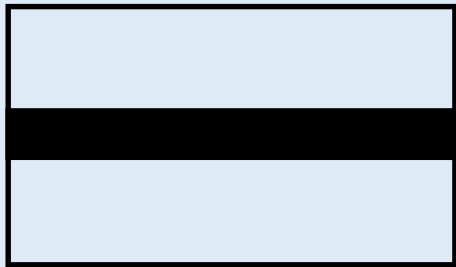
Расчетный спектр пропускания интерференционного фильтра при углах падения излучения  $0^\circ$  и  $6^\circ$



Зависимость пропускания фильтра №9 от частоты при падении излучения под углом 5.8 градуса к фильтру

№ фильтра	Макс. пропускание, %	ПШПВ, ГГц	Угол падения излуч., °
1	77	115	5
7	64	130	4.5
9	71	121	6

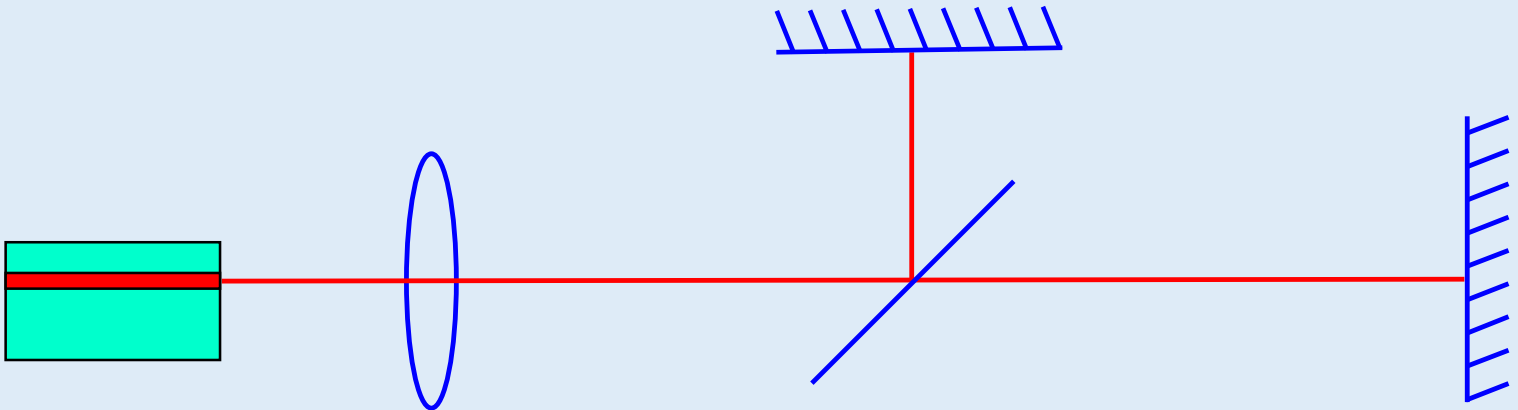
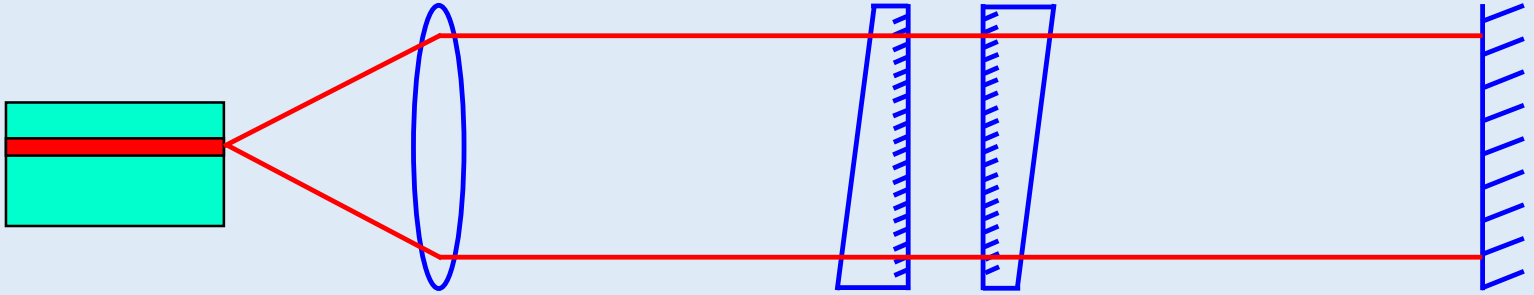
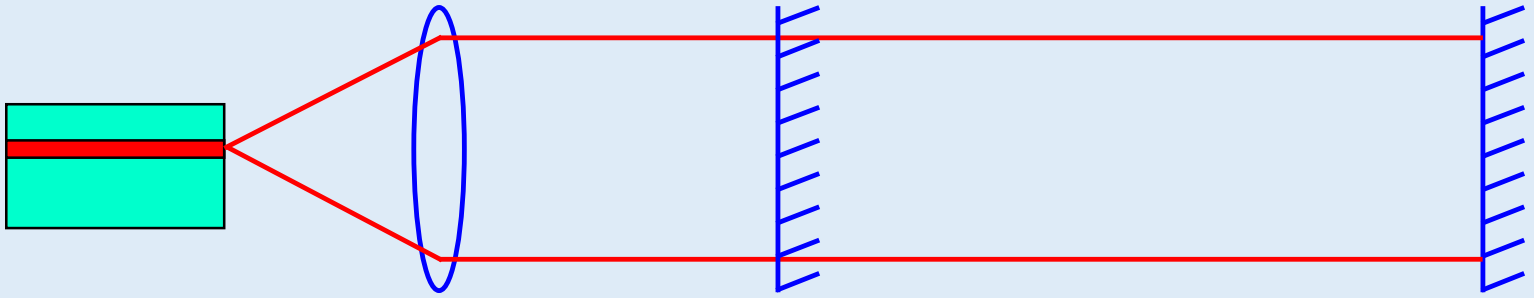
Результаты отбора фильтров из партии

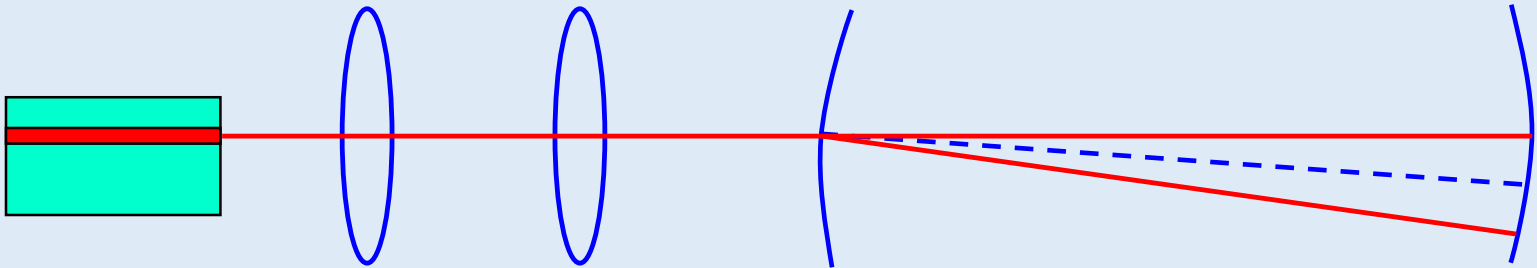
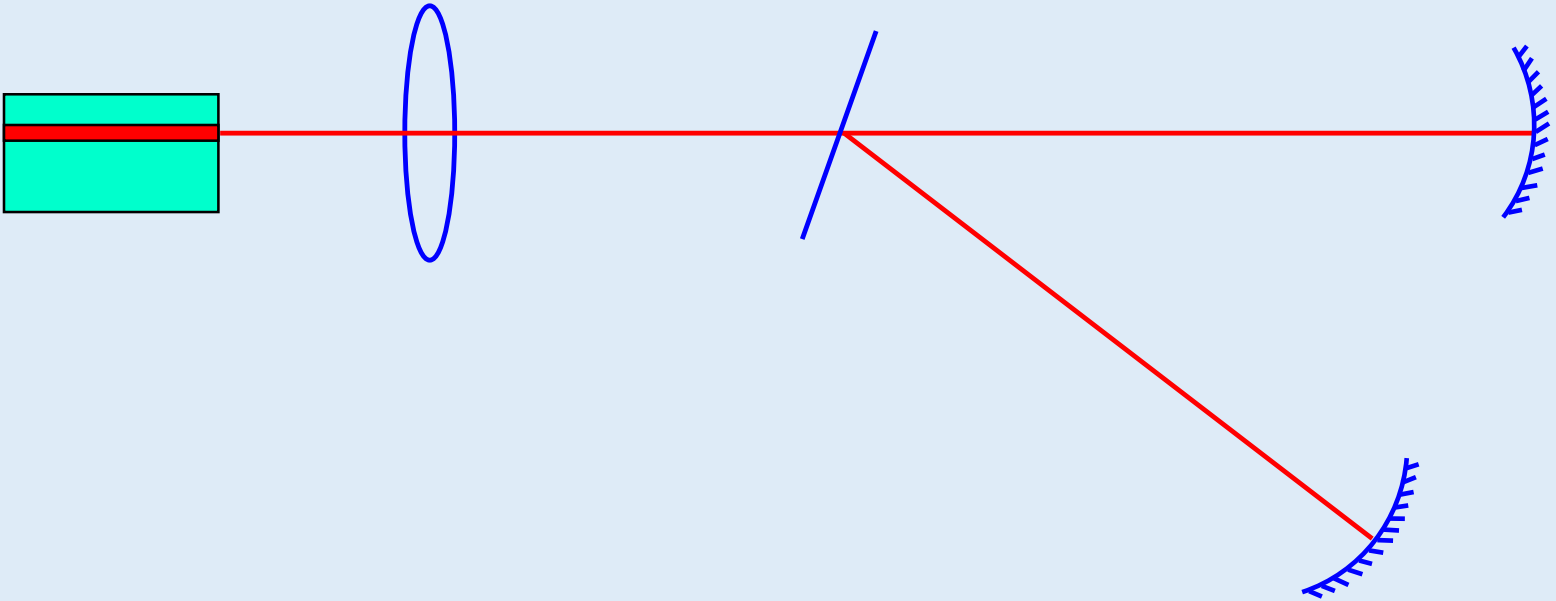


Nolatech, НИИ «Полюс» Москва

## IV Внешний резонатор («слабая» связь, многопроходный резонатор)

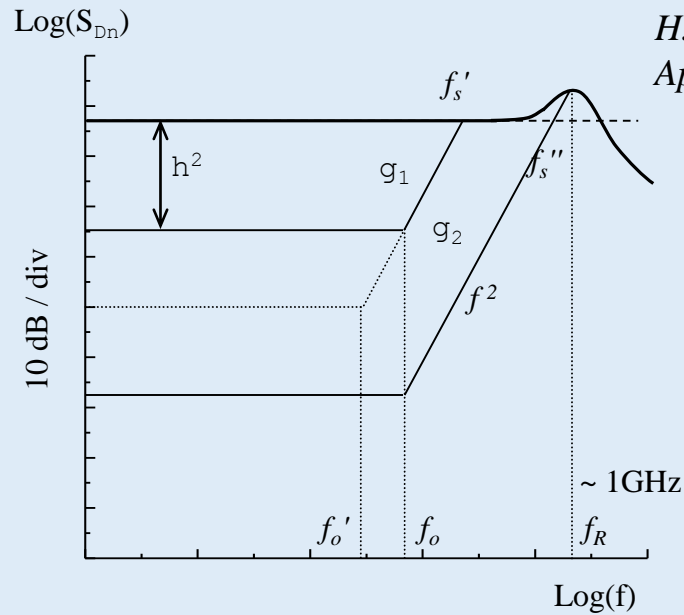
- Селектор Фокса-Смита
- Конфокальный интерферометр
- Ограничение на уровень связи
- Сильная связь и высокая добротность?
- Моды шепчущей галереи
- А.С. Зибров, В.Л. Величанский, В.С. Каргапольцев, В.И. Молочев, В.В. Никитин, В.А. Саутенков, Г.Г. Харисов, Д.А. Тюриков, «О предельной ширине линии генерации инжекционного лазера», Письма в ЖТФ, том **19**, (1974), 1087-1090.







# Stability condition



*H. Li, N. B. Abraham,  
Appl. Phys. Lett., 53, 2257 (1988)*

$$\Gamma = \Gamma_0 / \eta^2$$

$$\eta^2 = (1 + \gamma \sqrt{1 + \alpha^2} \frac{\Delta v_{LD}}{\Delta v_{INT}})^2 \cong \gamma^2 (1 + \alpha^2) \left( \frac{\Delta v_{LD}}{\Delta v_{INT}} \right)^2$$

$$v_s = \eta \Delta v_{INT} < v_0$$

$$\eta_{\max} = \frac{v_{REL}}{\Delta v_{INT}}$$

$$\Gamma_{\min} = \Gamma_0 \left( \frac{\Delta v_{INT}}{v_{REL}} \right)^2$$

# Methods for narrowing the emission line of an injection laser

É. M. Belenov, V. L. Velichanskiĭ, A. S. Zibrov, V. V. Nikitin, V. A. Sautenkov, and A. V. Uskov

*P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences of the USSR, Moscow*  
 (Submitted July 3, 1982)  
 Kvantovaya Elektron. (Moscow) 10, 1232-1243 (June 1983)

Theoretical estimates of narrowing of the emission line of an injection laser with an external resonator are obtained for different mechanisms that determine the line width. If the width of a line emitted by a laser diode without an external feedback ("initial" width) is governed by phase fluctuations because of the spontaneous noise, then the width of a line emitted by an injection laser with an external resonator is a quadratic function of the line width of the resonator itself. However, if the initial width is determined by fluctuations of the refractive index of the active medium, then the same dependence is linear. It is shown that external resonator configurations used so far have not been optimal. Ways are suggested for introducing high- $Q$  interferometers into the external part of a composite resonator of an injection laser, which should make it possible to reduce the width of the emission line of a laser with an external resonator to  $\sim 10^7$  Hz without altering the dimensions. An analysis is made of the influence of a wide-band electronic circuit for automatic phase control (based on an external high- $Q$  interferometer) on the emission spectrum of an injection laser. It is shown that the "natural" width of an emission line may be reduced by between four and six orders of magnitude if the proposed method is used.

PACS numbers: 42.55.Ps, 42.60.Ds

## 1. EXTERNAL OPTICAL FEEDBACK

Tunable lasers with a very narrow emission line are needed in high-resolution spectroscopy and in frequency standards for the optical range.<sup>1</sup> Injection lasers can compete in such applications with dye and color center lasers only if the emission line of the injection lasers is reduced sufficiently. We shall con-

tional to the output power of the laser  $P_0$ . Among the mechanisms that can result in additional line broadening the most interesting are those satisfying the relationship  $\Gamma_0 = 1/P_0$ . An allowance for the saturation<sup>10</sup> gives precisely this relationship. However, according to Ref. 10, the coefficient in front of  $1/P_0$  differs considerably for the cases of strong and weak fields, which

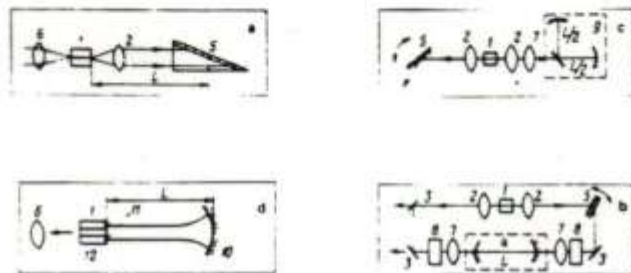
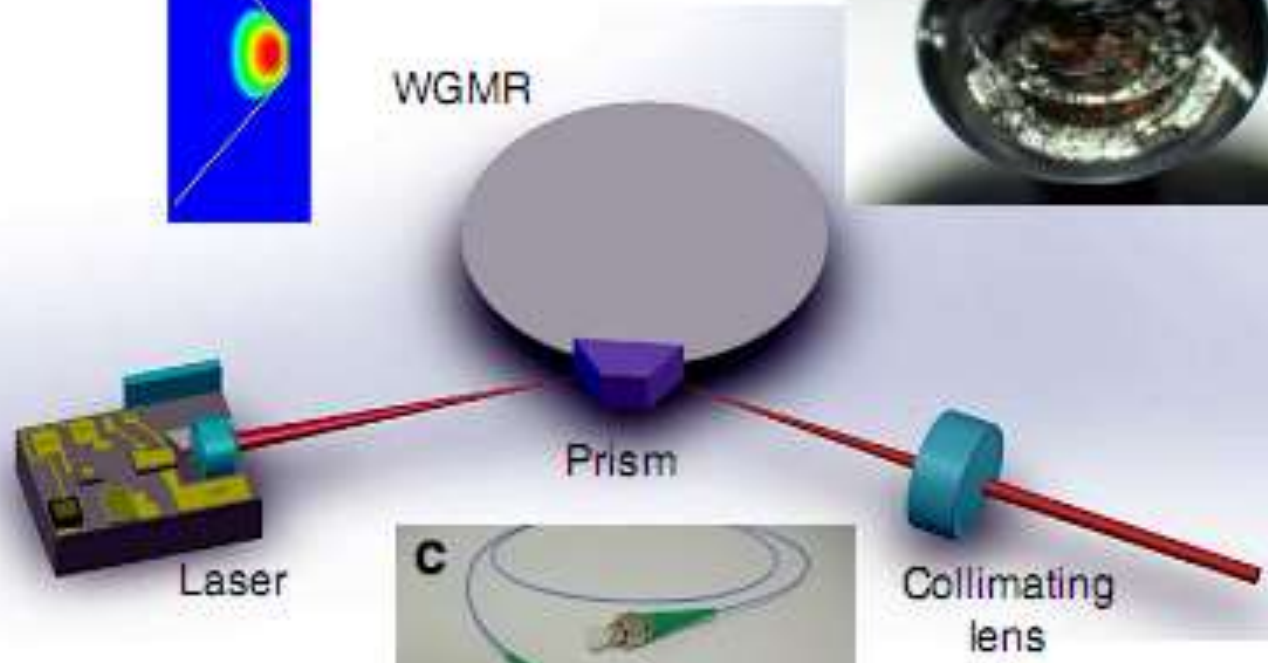
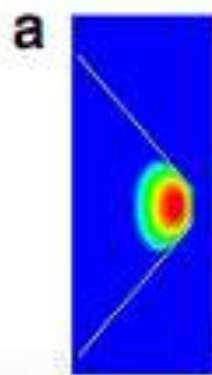


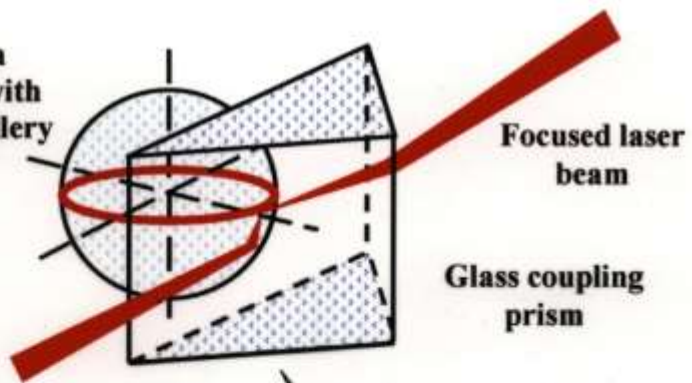
FIG. 1. Configurations of lasers with external resonators:  
 1) injection laser; 2) matching objective; 3) mirrors; 4) confocal interferometer; 5) selective components; 6) exit objective; 7) matching lenses; 8) optical isolator; 9) Fox-Smith selector; 10) spherical mirror; 11) reflecting coating; 12) active region.

## II ГИБРИДНЫЕ ВАРИАНТЫ

- РБО+волоконный световод
- ИЛВР +ЭОС от high-Q ca`vity
- ИЛВР + high-Q ca`vity

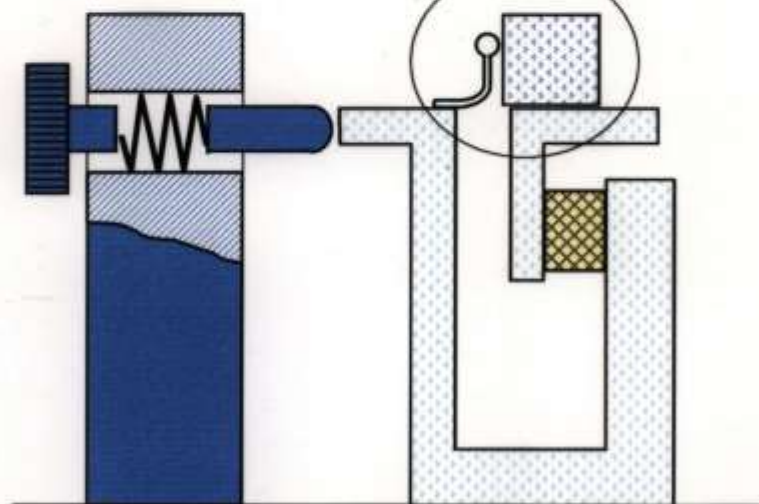


**Fused silica  
microcavity with  
whispering gallery  
mode**



**Focused laser  
beam**

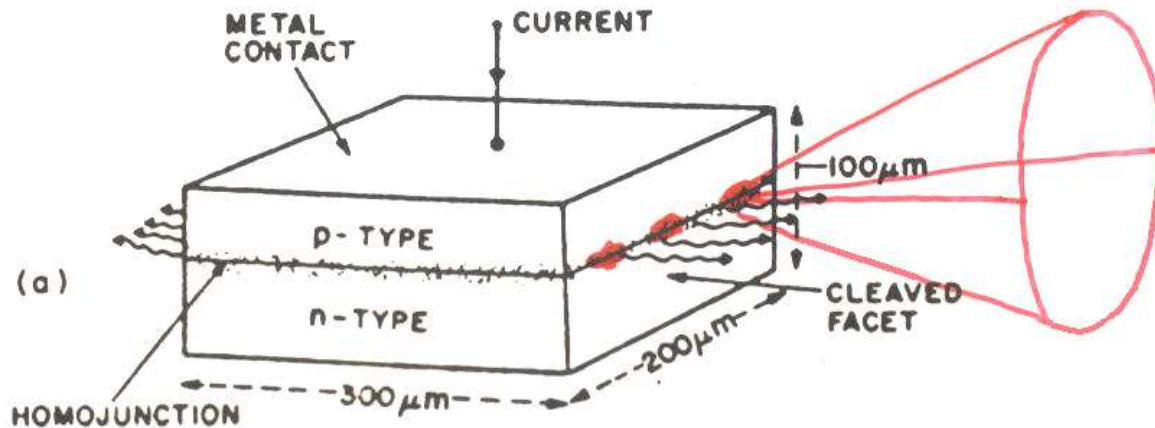
**Glass coupling  
prism**



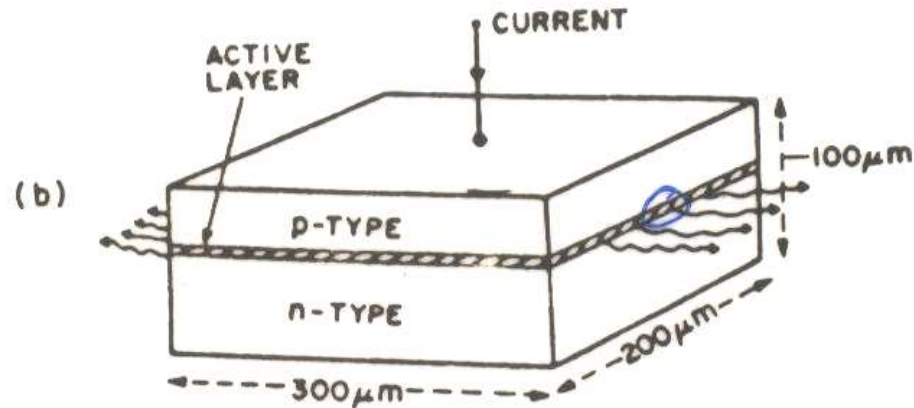
Vassiliev V.V., Velichansky V.L., Il'chenko V.S., Gorodetsky M.L.,  
Hollberg L., Yarovitsky V.A. “  
Narrow-line-width diode laser with a high-Q microsphere resonator.”-  
Opt. Commun., **158**, №1, (1998), 305-312.

А.Н.Ораевский, А.В.Яровицкий, В.Л.Величанский, «Ст  
абелизация частоты  
полупроводникового лазера модой шепчущей галереи»  
«Квантовая Электроника» **31**, №10, (2001), 897-903.

Усиление



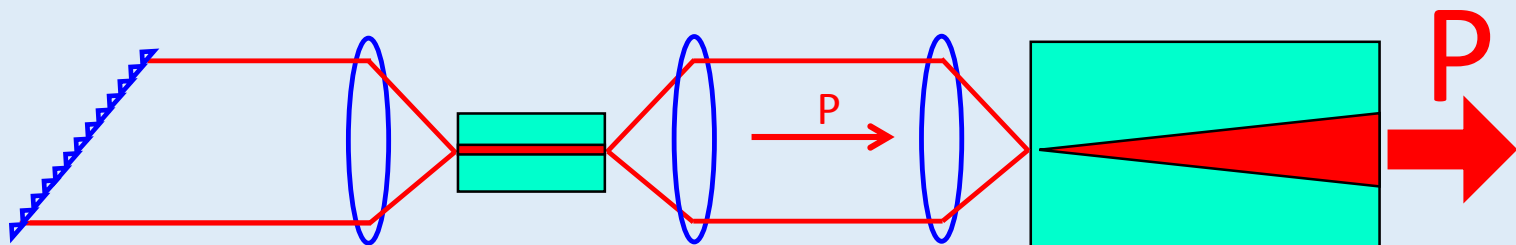
$$\theta_{\perp} \sim 40^{\circ}$$

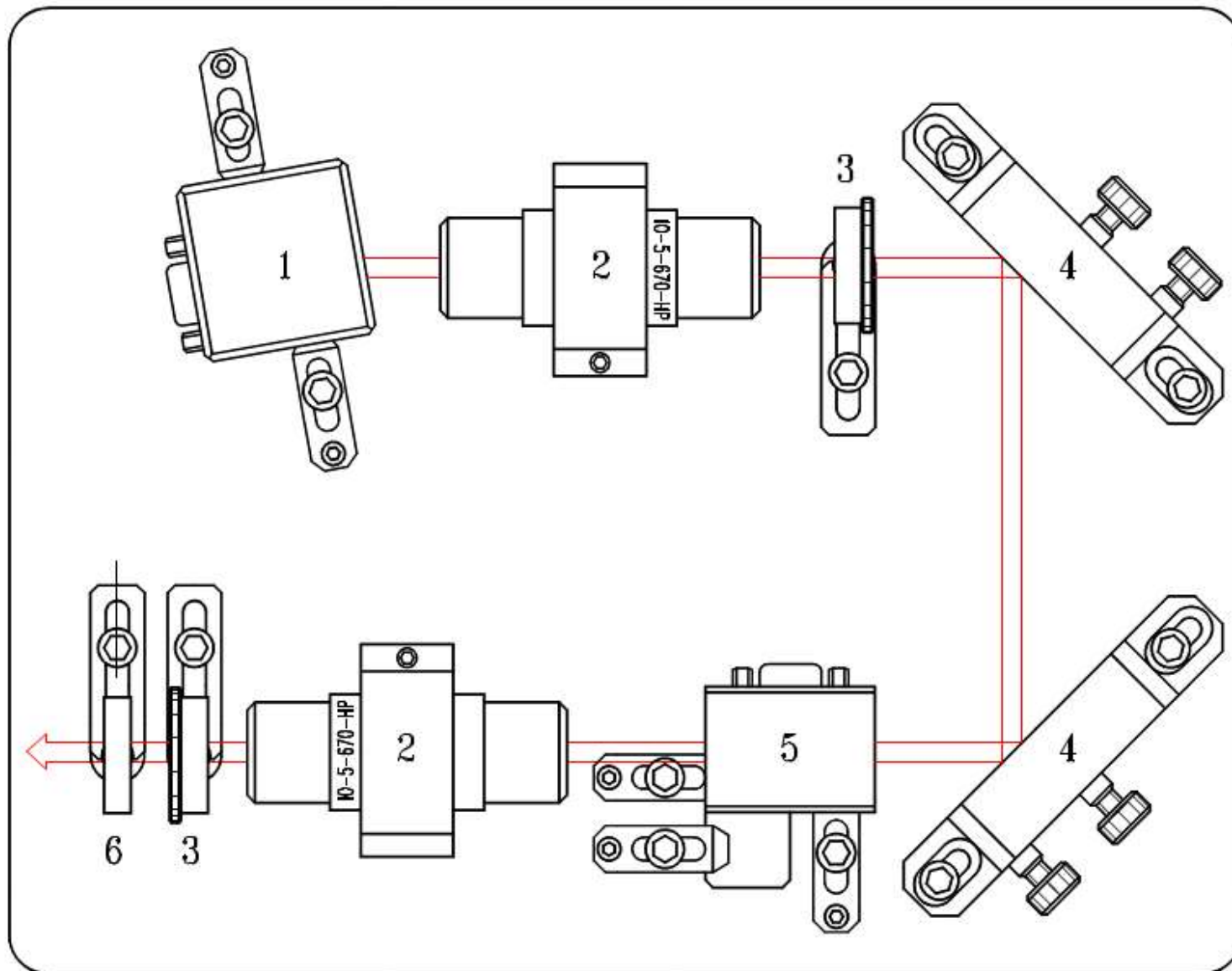


$$\theta_{\parallel} \sim 10^{\circ}$$

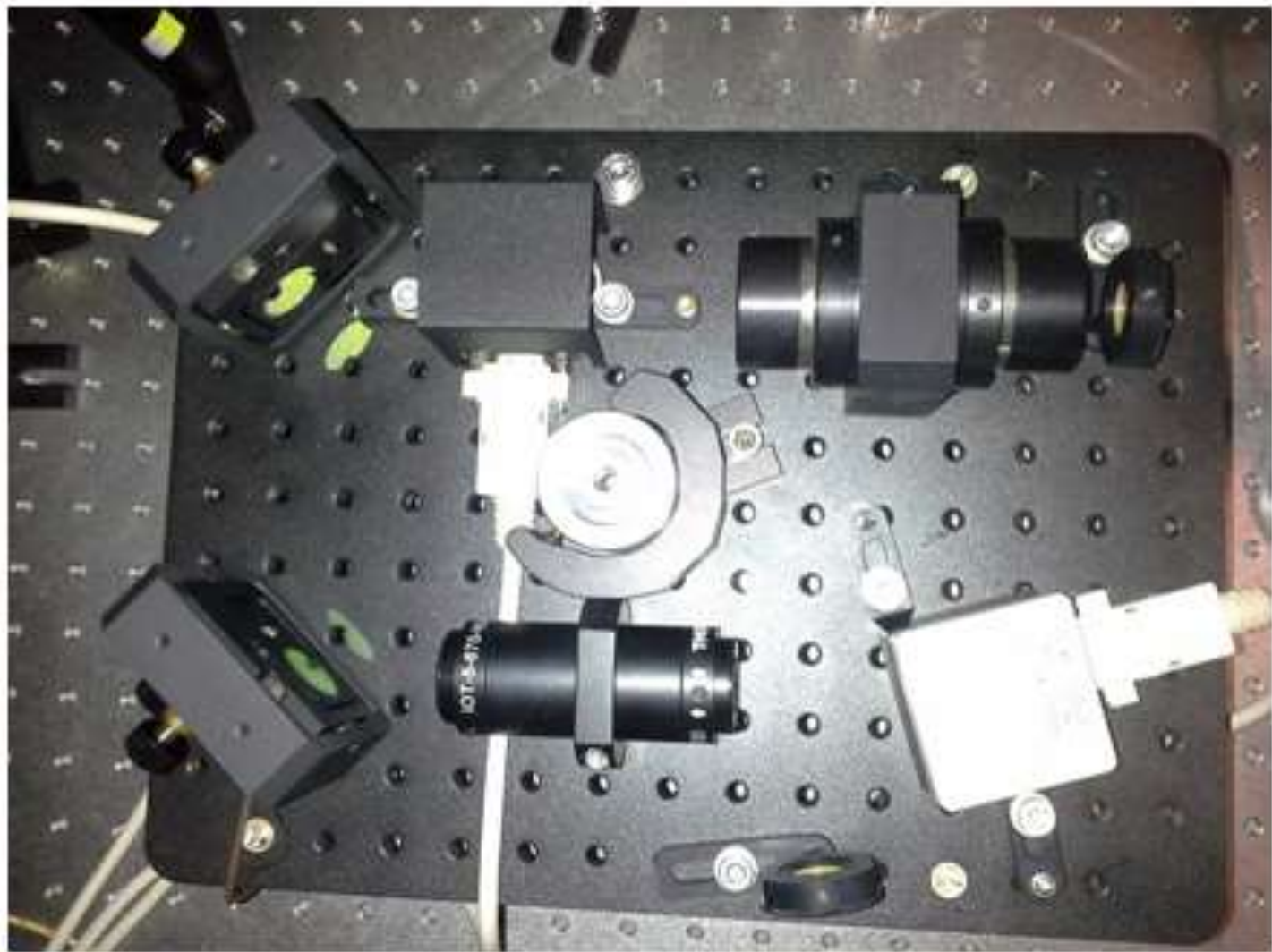
Selffocusing  $P \nearrow N_e \searrow n \nearrow \alpha \searrow P \nearrow$  many independent overlapping spectra  
 Nonlinear light – current character. Complicated near – and far – fields.  
**VERY BAD LASERS INDEED**



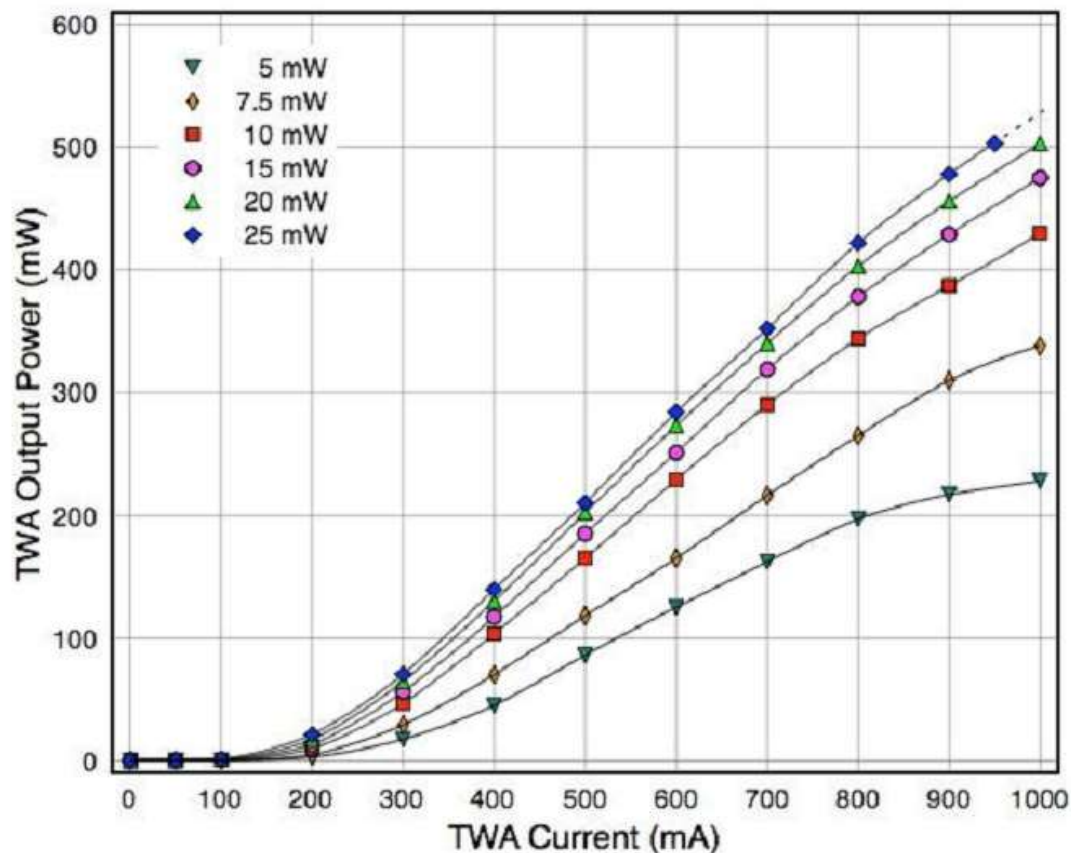




**Оптическая схема системы MOPA-671-500.** 1 – ECDL-6725R; 2 – оптические развязки; 3 – полуволновые пластинки; 4 – юстировочные оправы; 5 – усилитель оптической мощности; 6 – цилиндрическая линза.

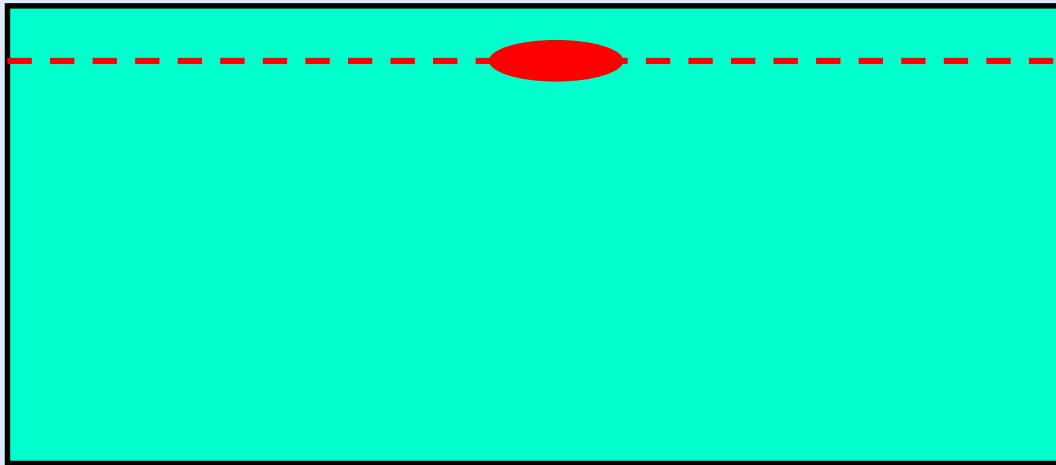
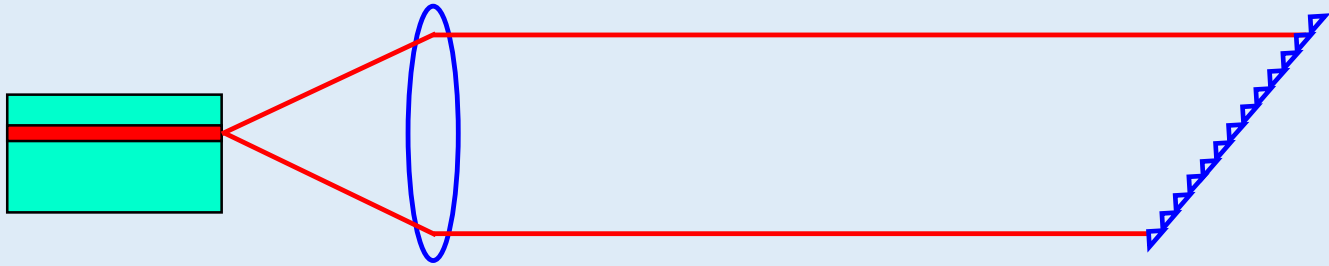


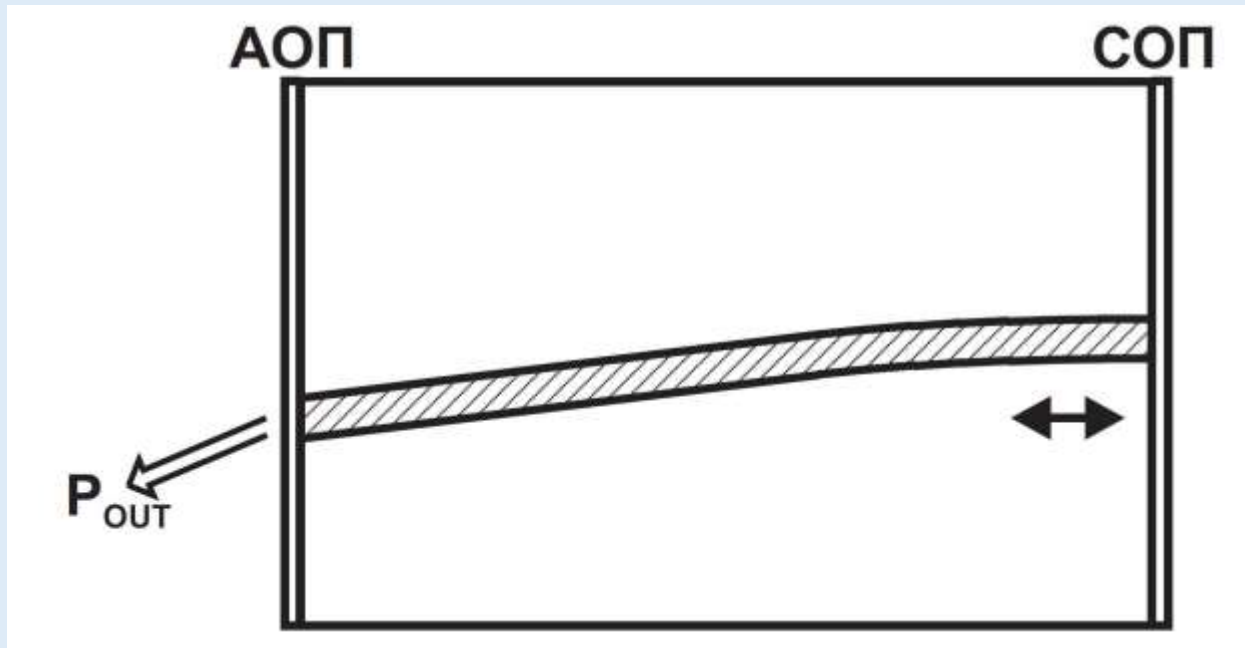
## Выходные характеристики оптического усилителя в составе лазерной системы МОРА-671-500.

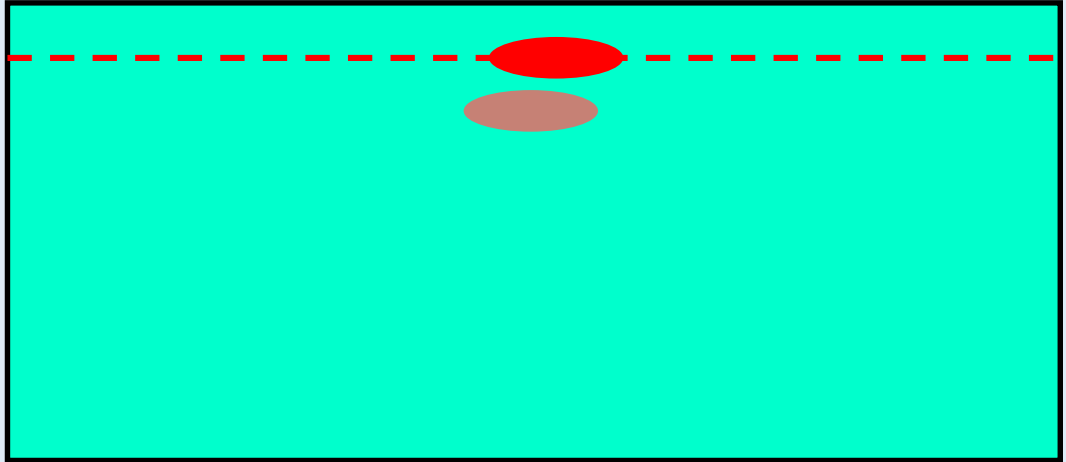
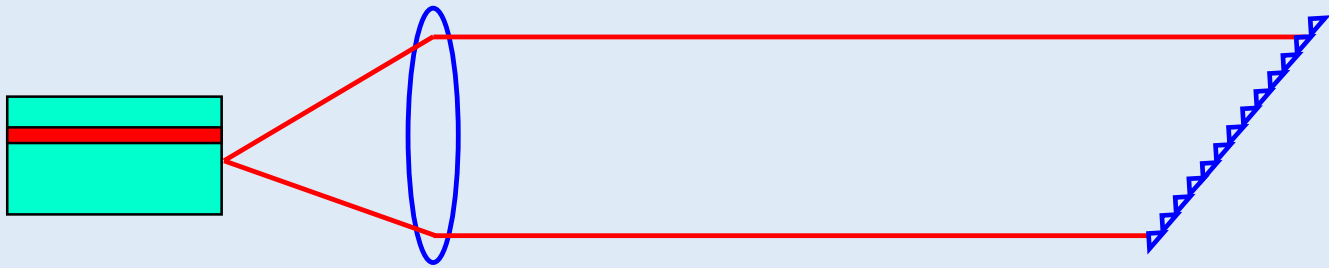


**Зависимость выходной мощности оптического усилителя от тока накачки при различных уровнях впрыска**

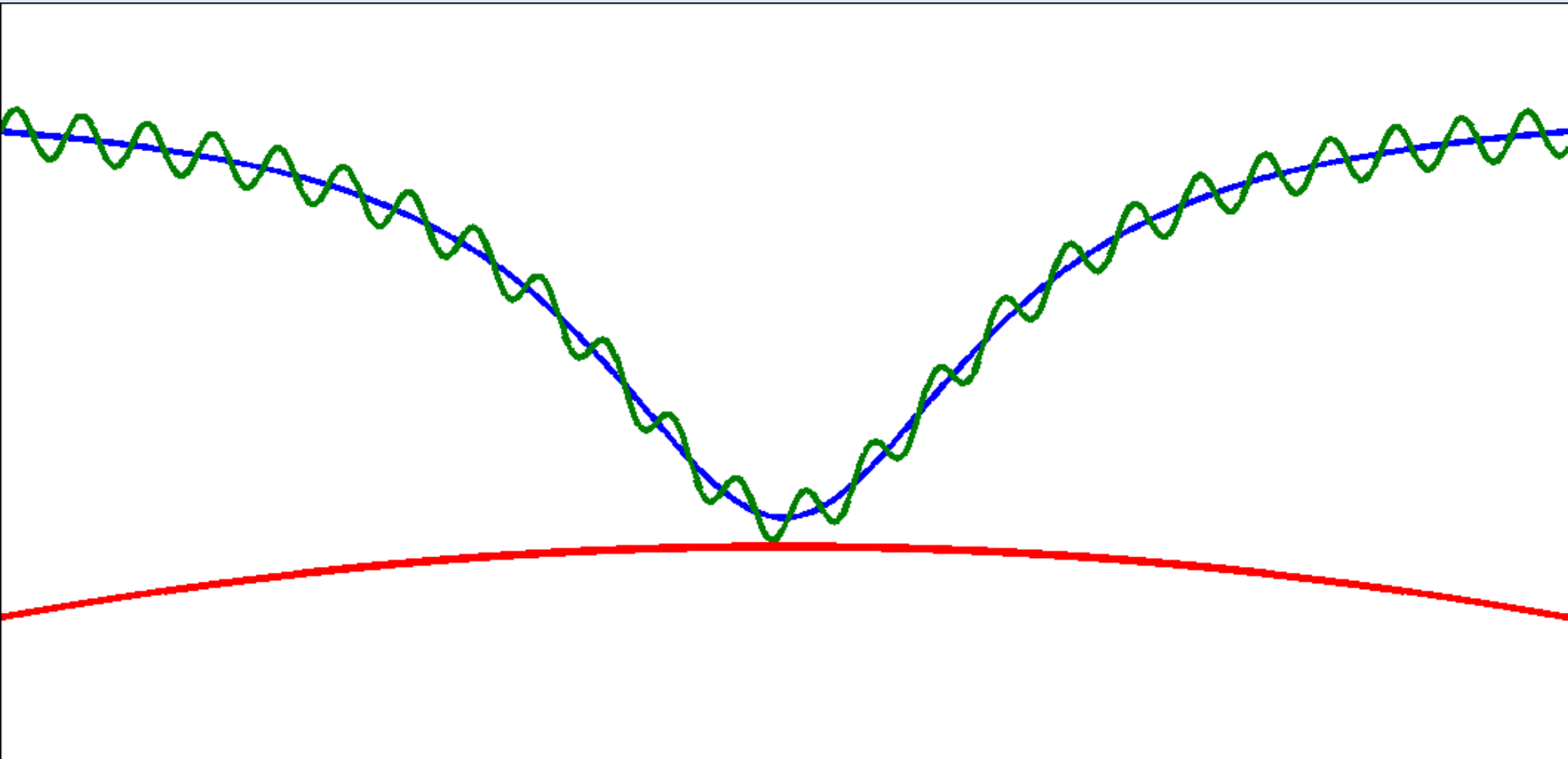
**ЕЩЕ НЕМНОГО ФИЗИКИ**

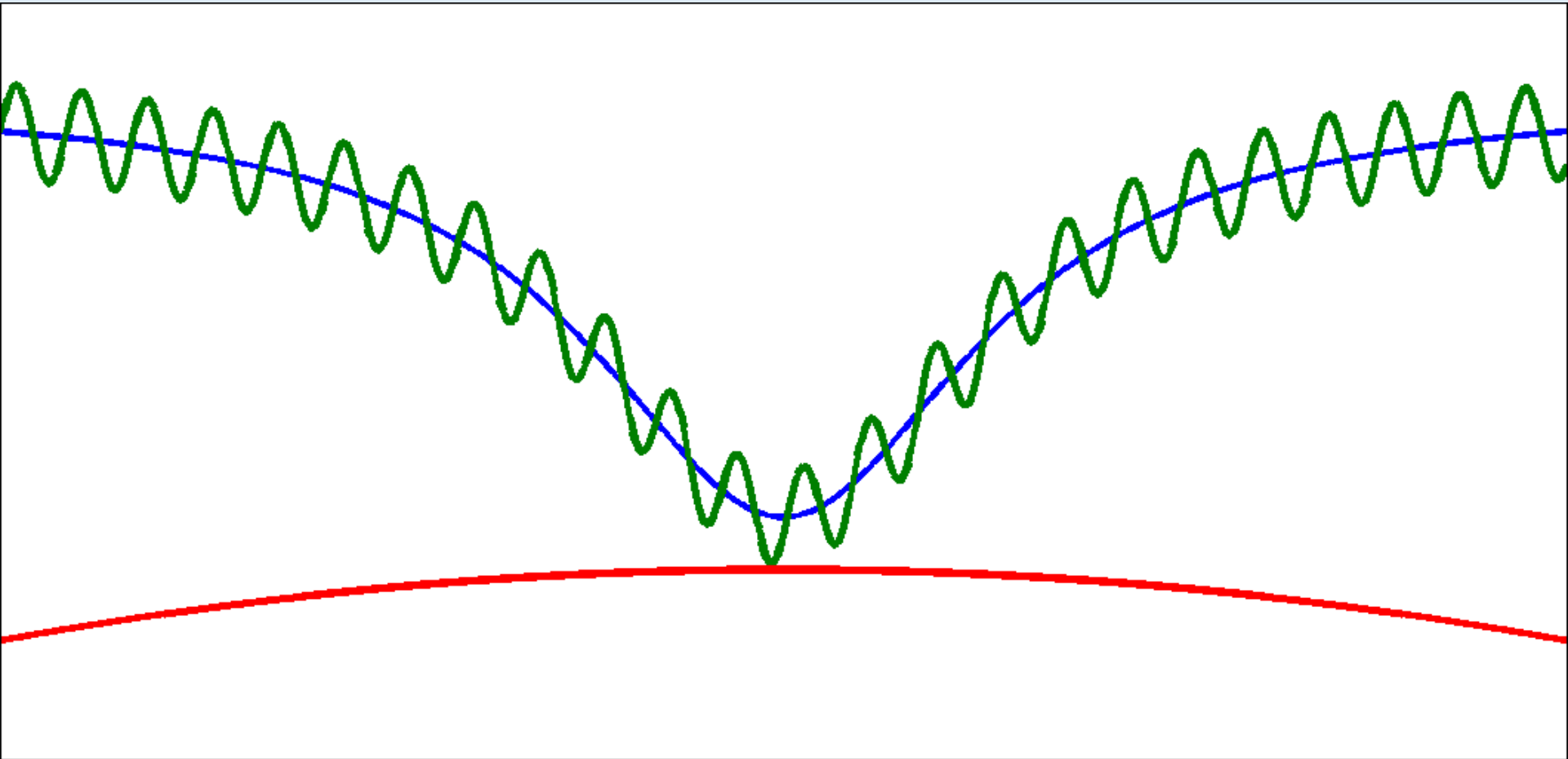


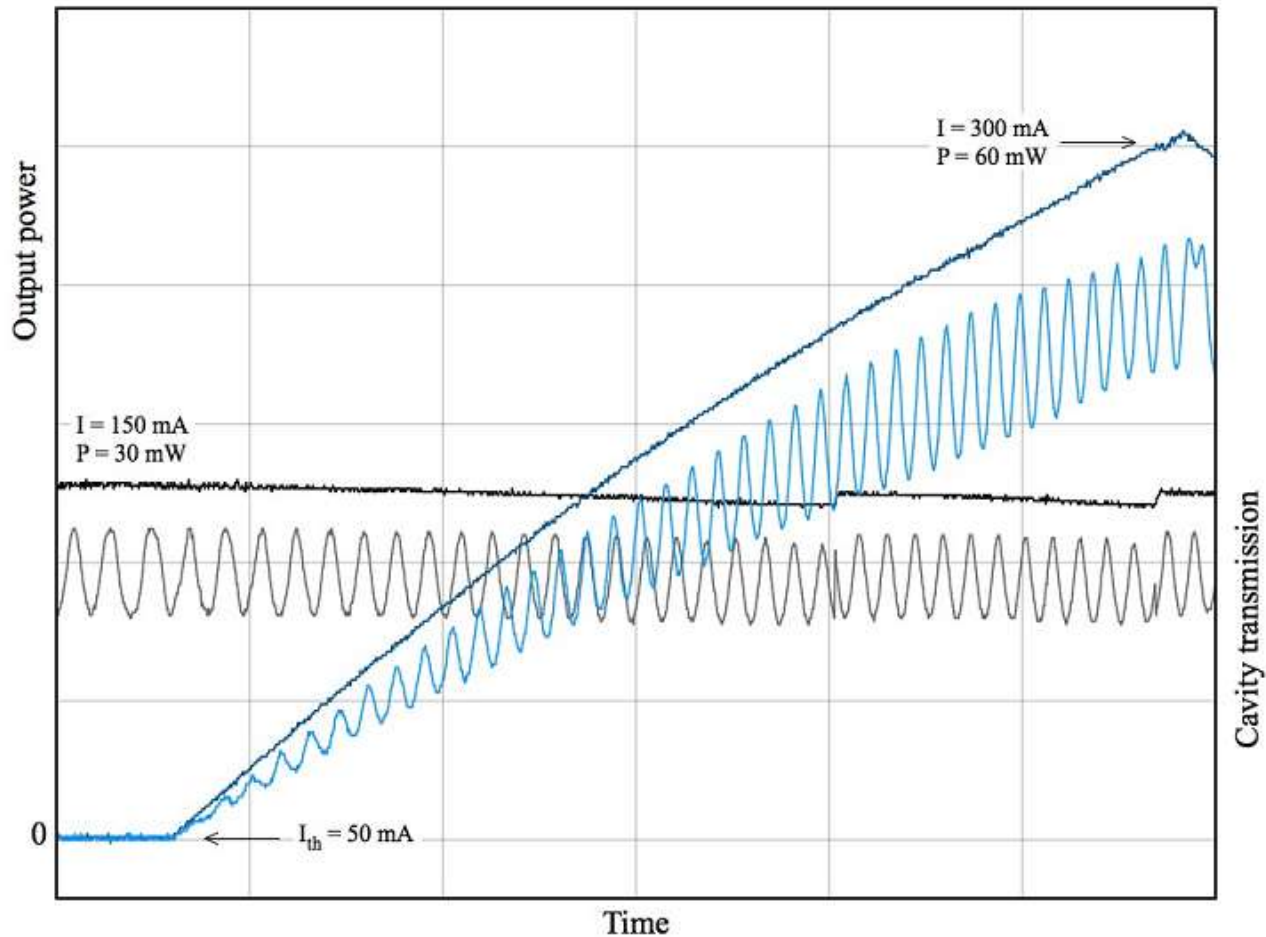




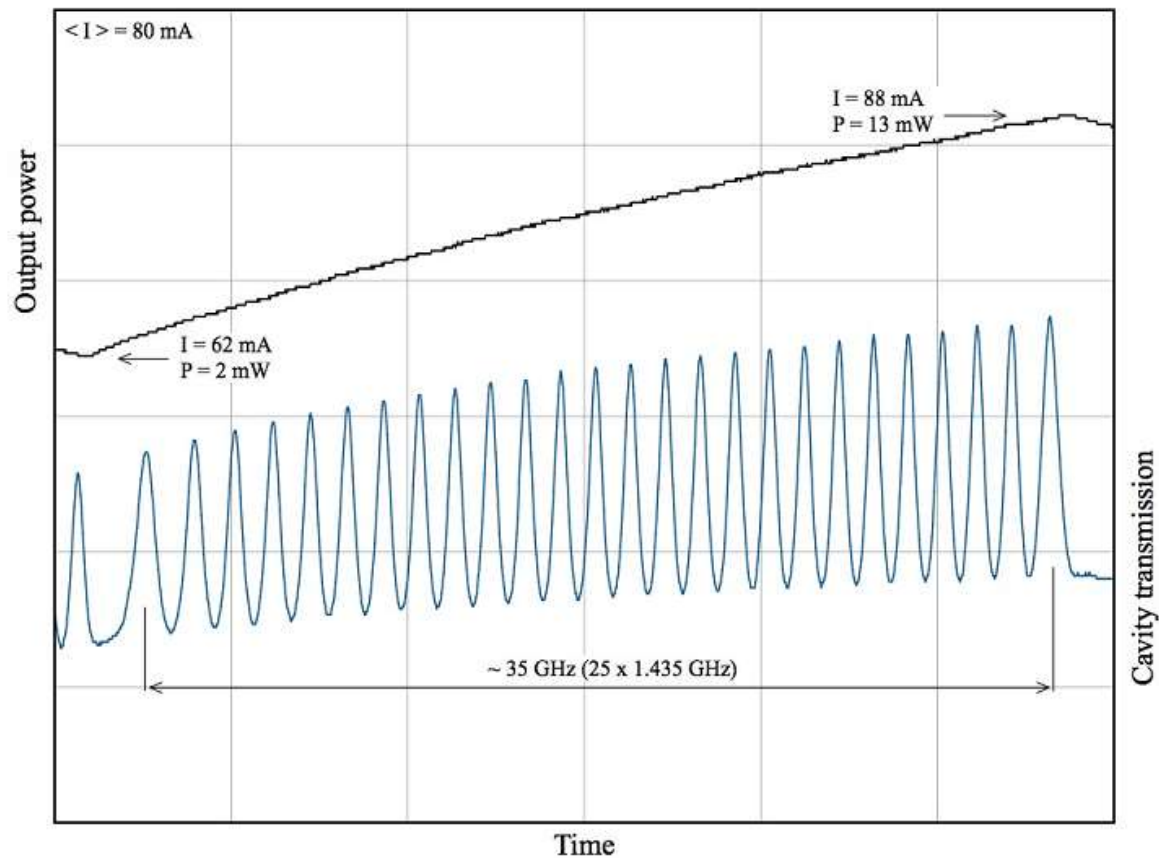




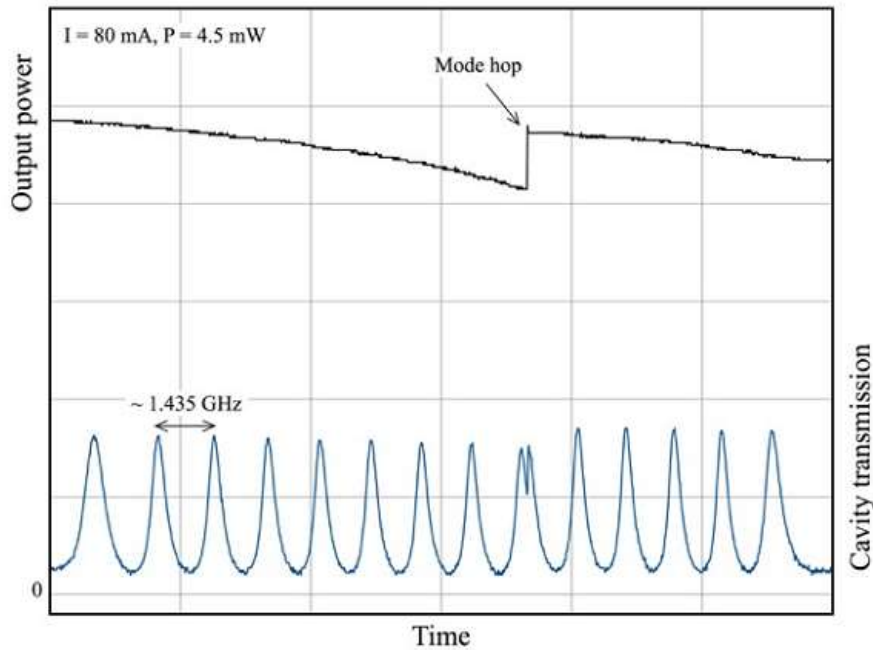




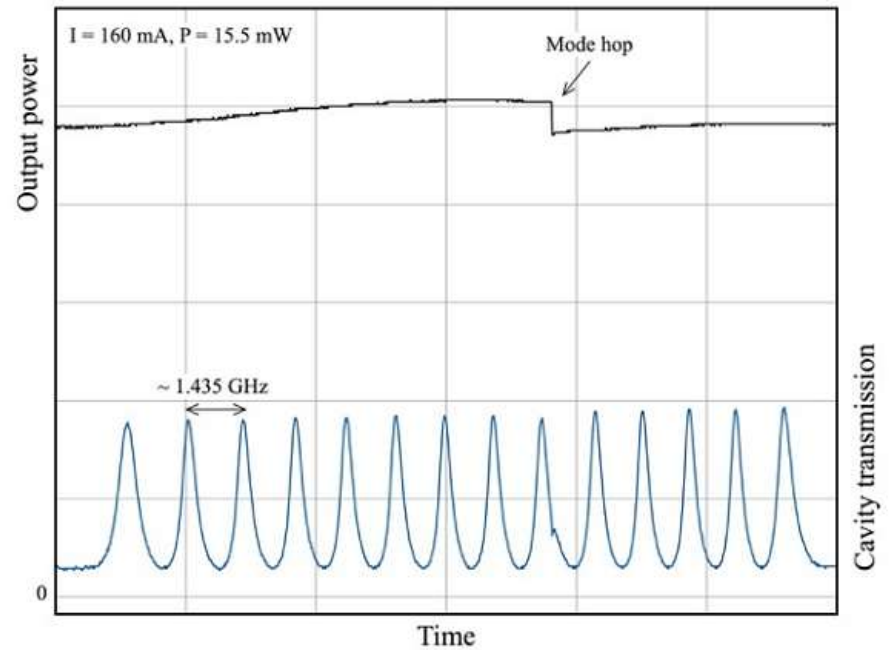
**Зависимости мощности ECDL-13430RG (черная и синяя кривые) и пропускание эталона (серая и голубая кривые) при сканировании только пьезоэлемента (черная и серая кривые) и при синхронном сканировании пьезоэлемента и тока накачки (синяя и голубая кривые).**



**Зависимость мощности ECDL-4210R (верхняя кривая) и пропускание эталона (нижняя кривая) при синхронном сканировании пьезоэлемента и тока накачки.**

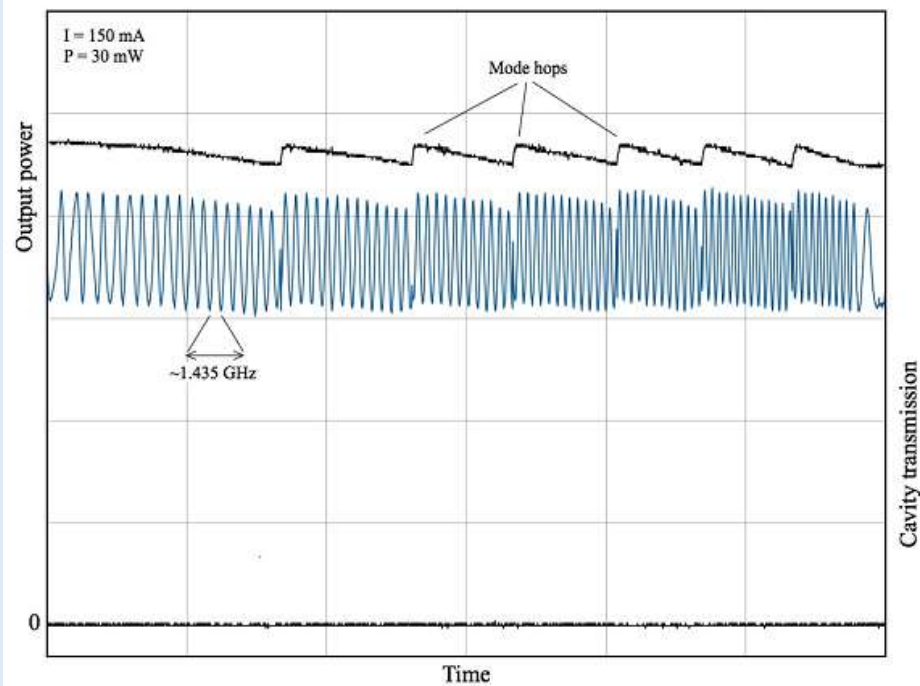


a)

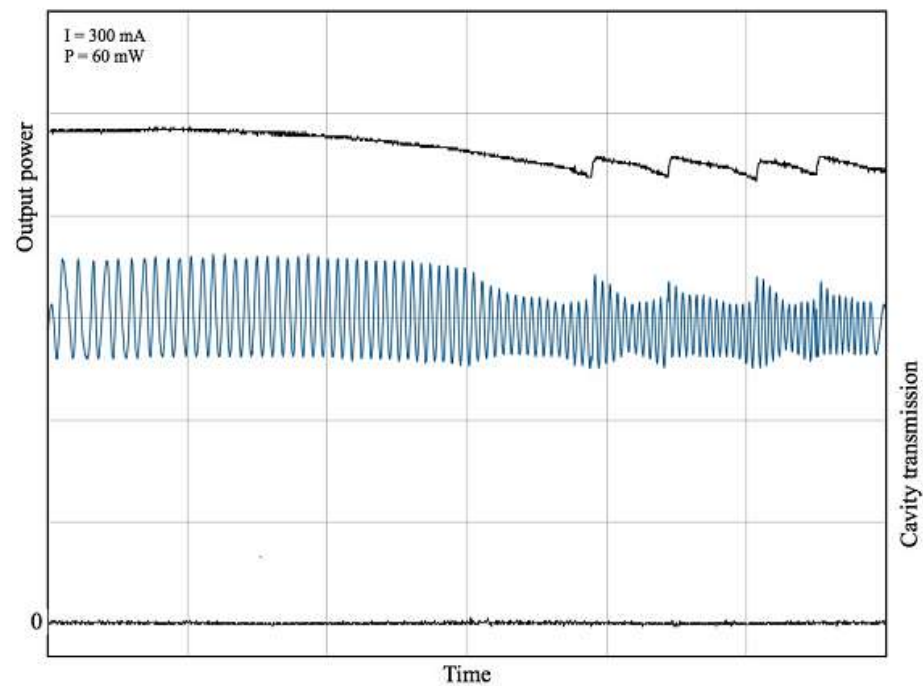


b)

**The laser output power (the upper black curves) and the transmission of the reference cavity (the lower blue curves) on the PZT voltage sweeping. Only one slope of the modulating signal is shown. The free spectrum range of the reference cavity is 1.435 GHz.**

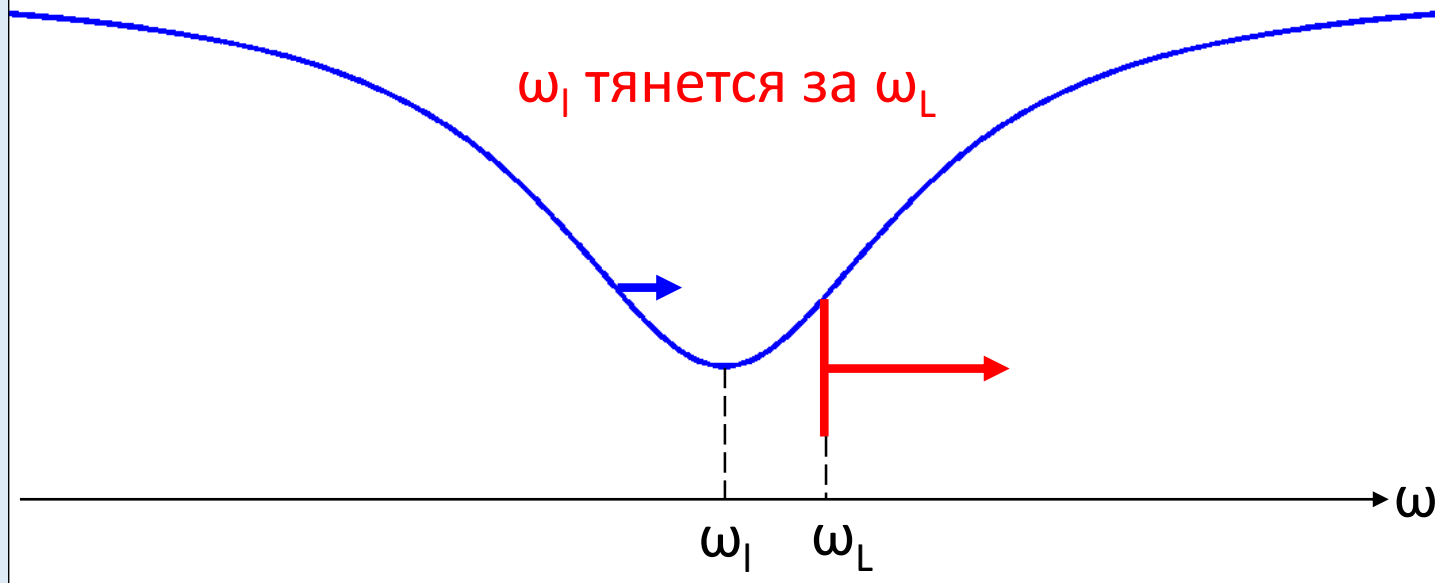


a)

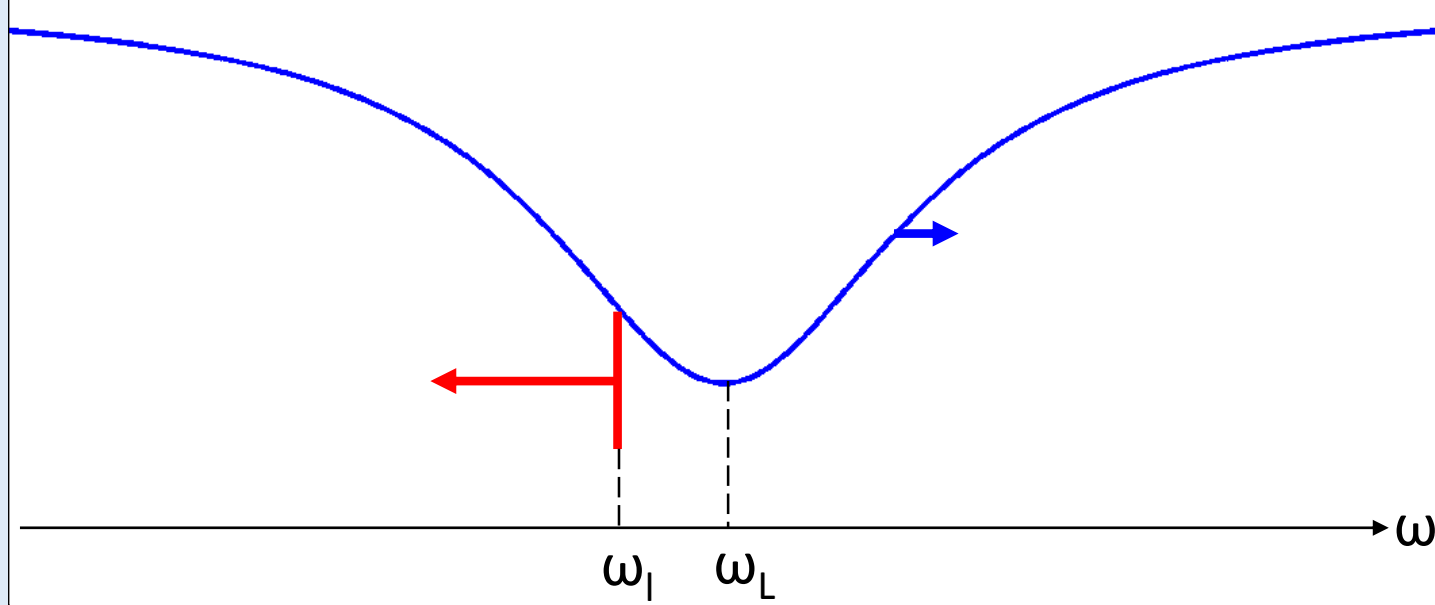


б)

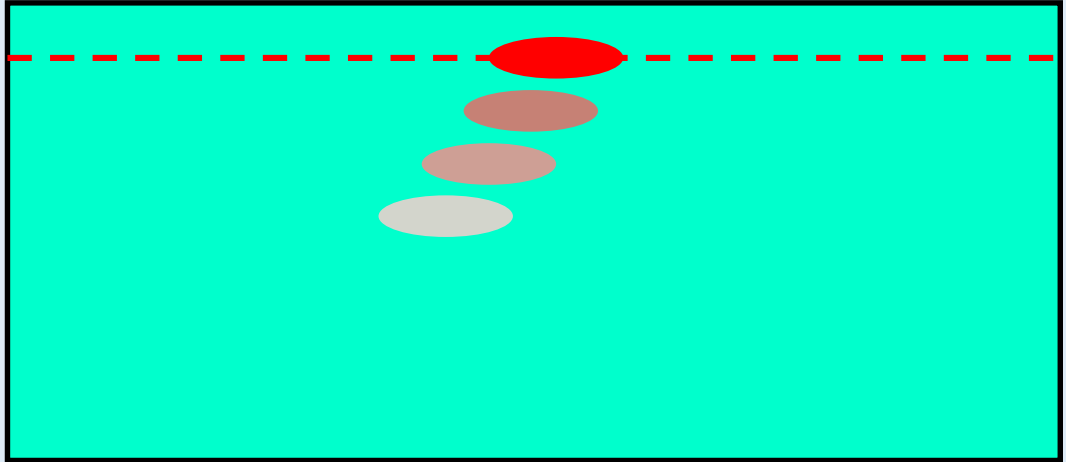
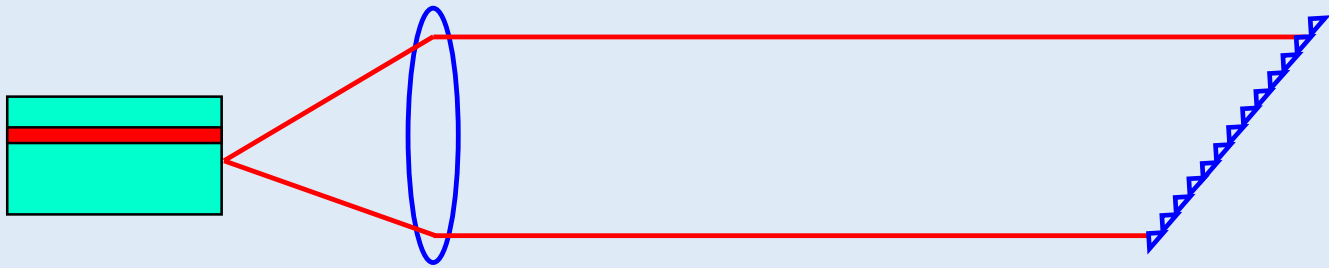
**Зависимости выходной мощности лазера (черные кривые) и пропускания эталона (синие кривые) от линейно меняющегося во времени напряжения на пьезоэлементе при токах накачки 150 мА (а) и 300 мА (б).**



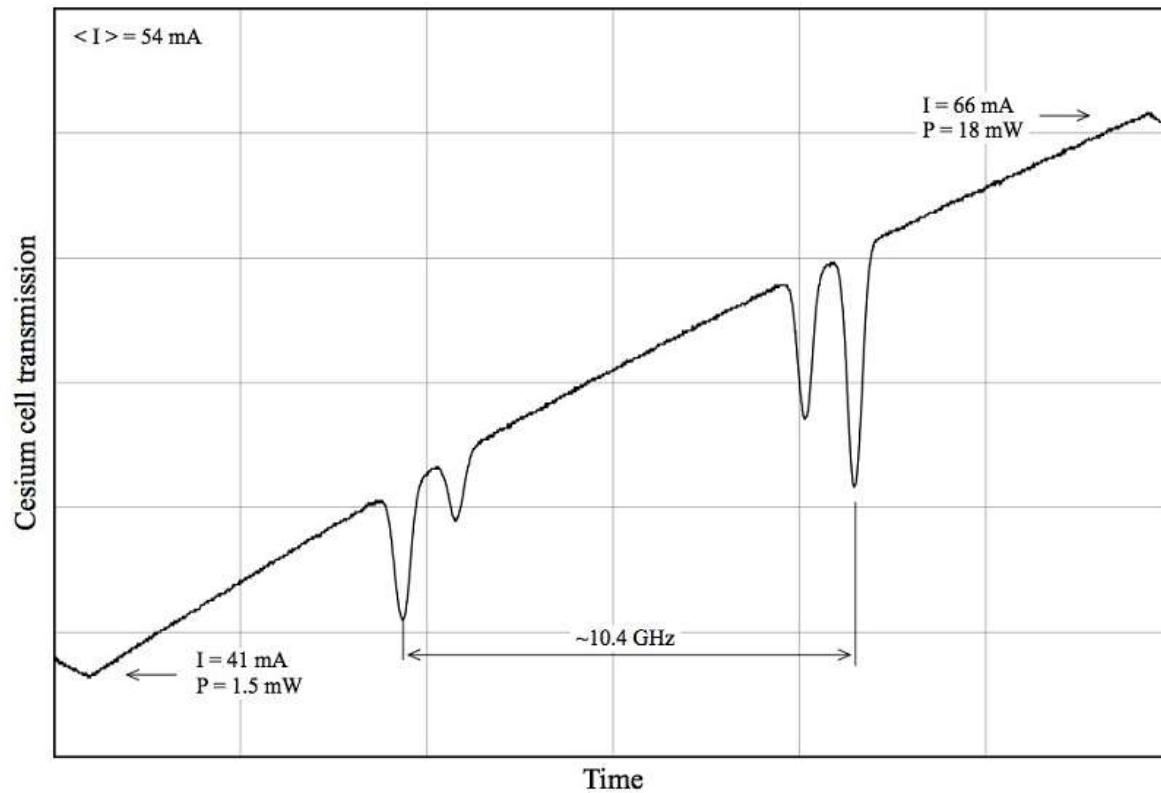
$|\omega_1 - \omega_L| \nearrow$  Потери  $\nearrow$  Усиление  $\nearrow$   $Ne \nearrow n \searrow \omega_1 \nearrow$



$\omega_1$  бежит в противоположную сторону;  
**неустойчивость, перескок моды**







**Пропускание ячейки с парами Cs при синхронном сканировании дифракционной решетки и тока ЛД.**

Automatic system to control the operation of an extended cavity diode laser

F. Allard, I. Maksimovic, M. Abgrall, and Ph. Laurent

a)

BNM-SYRTE, CNRS UMR 8630, Observatoire de Paris, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

~Received 30 July 2003; accepted 27 October 2003!

This article describes an automatic system that permanently keeps an extended cavity diode laser ~ECDL! frequency locked to a cesium line ~852 nm!. The ECDL has a new architecture based on an intracavity e ´ talon. The laser power is 30 mW and the linewidth is narrower than 50 kHz. Two acousto-optic modulators finely change the laser frequency and optical power. The electronic control is composed of a computer, microcontrollers, digital analog converters, and direct digital synthesizers. **The computer searches the ECDL parameters to tune it to the Cs line and closes the servoloop. It permanently checks the servoloop and relocks the laser if necessary.** Both acousto-optic modulators are driven in real time by microcontrollers. They are programmed in order to control the laser power and frequency with a predefined time sequence. This system, especially developed for an atomic fountain, can be easily adapted to a wide range of applications. ©2004 American Institute of Physics. @DOI: 10.1063/1.1634359#

**REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 75, NUMBER 1 JANUARY 2004**

# Заключение

- Сильна оптическая обратная связь доминирует

Иногда в комбинации с электронной обратной связью по сигналу от высокочастотного интерферометра для сужения и стабилизации частоты

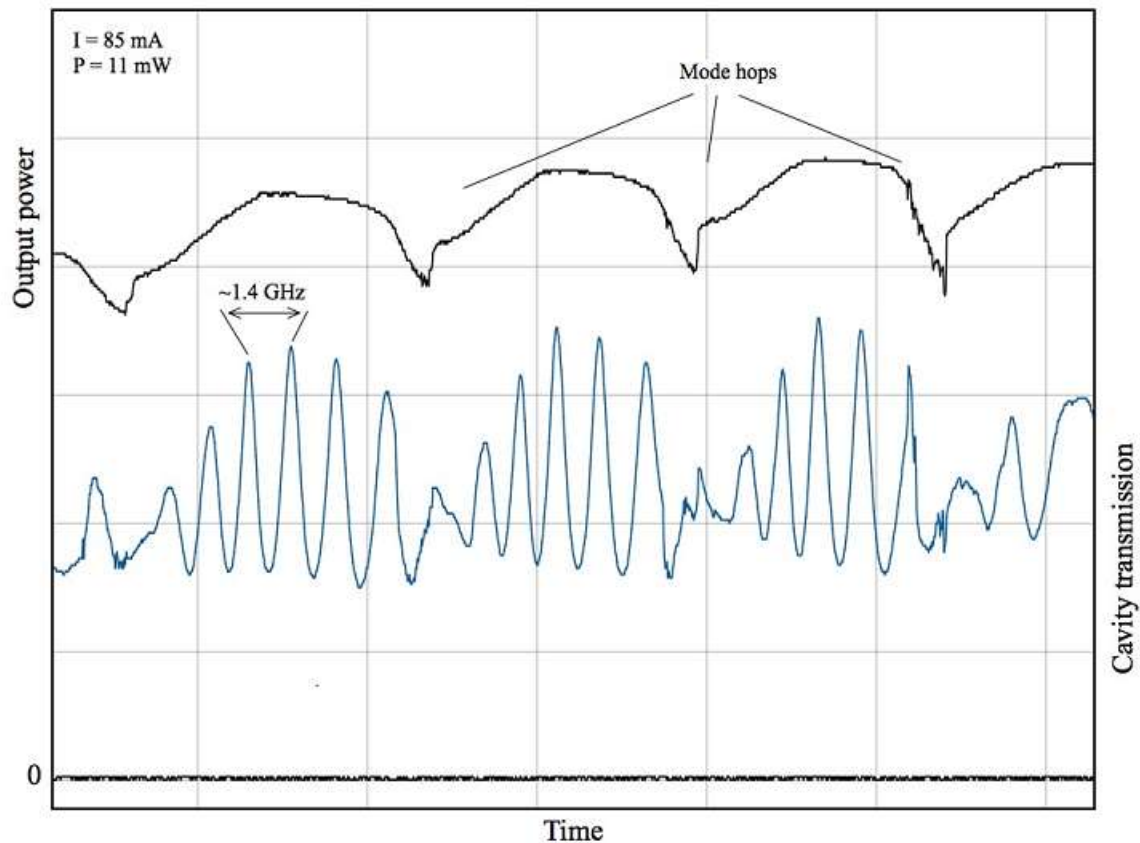
- VITAWAVE (ФИАН)
- NOLATECH (НИИ «ПОЛЮС» Москва)
- Toptica
- Слабая связь с высокочастотным резонатором на МШГ

Qewave 0,6 Гц

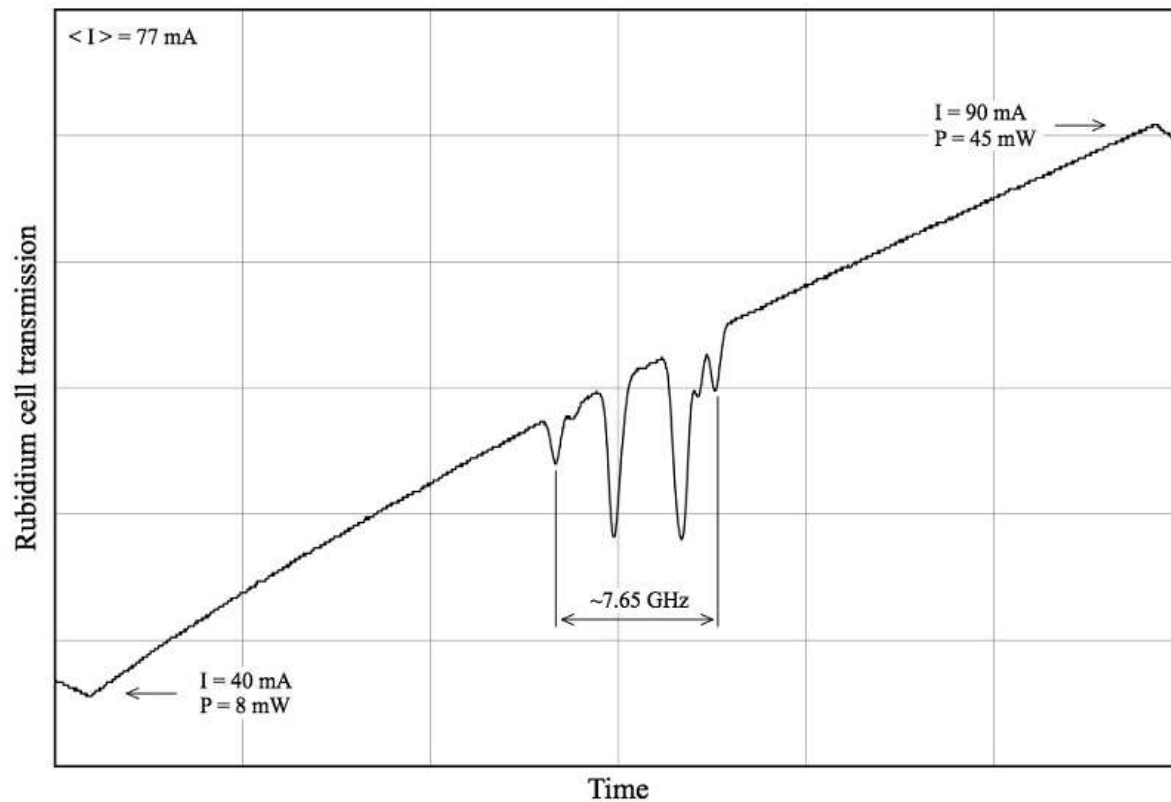
<300 Гц , <100 мВт,, 685, 795, 1030, 1550, 2000, 4500 нм

**n = n(Ne)!!!**

Спасибо за внимание

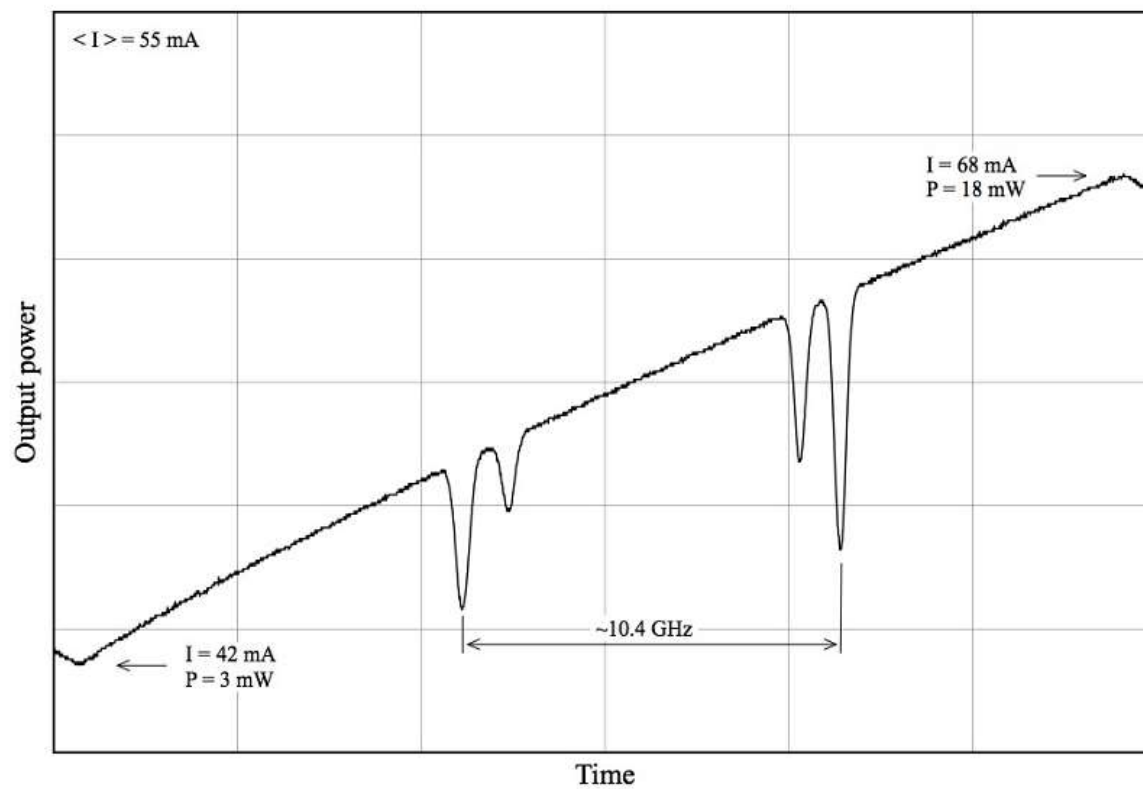


**Зависимость выходной мощности лазера от напряжения на пьезоэлементе при постоянном токе LD (верхняя черная кривая). Внизу – пропускание эталона Фабри-Перо с областью свободной дисперсии 1.435 ГГц.**

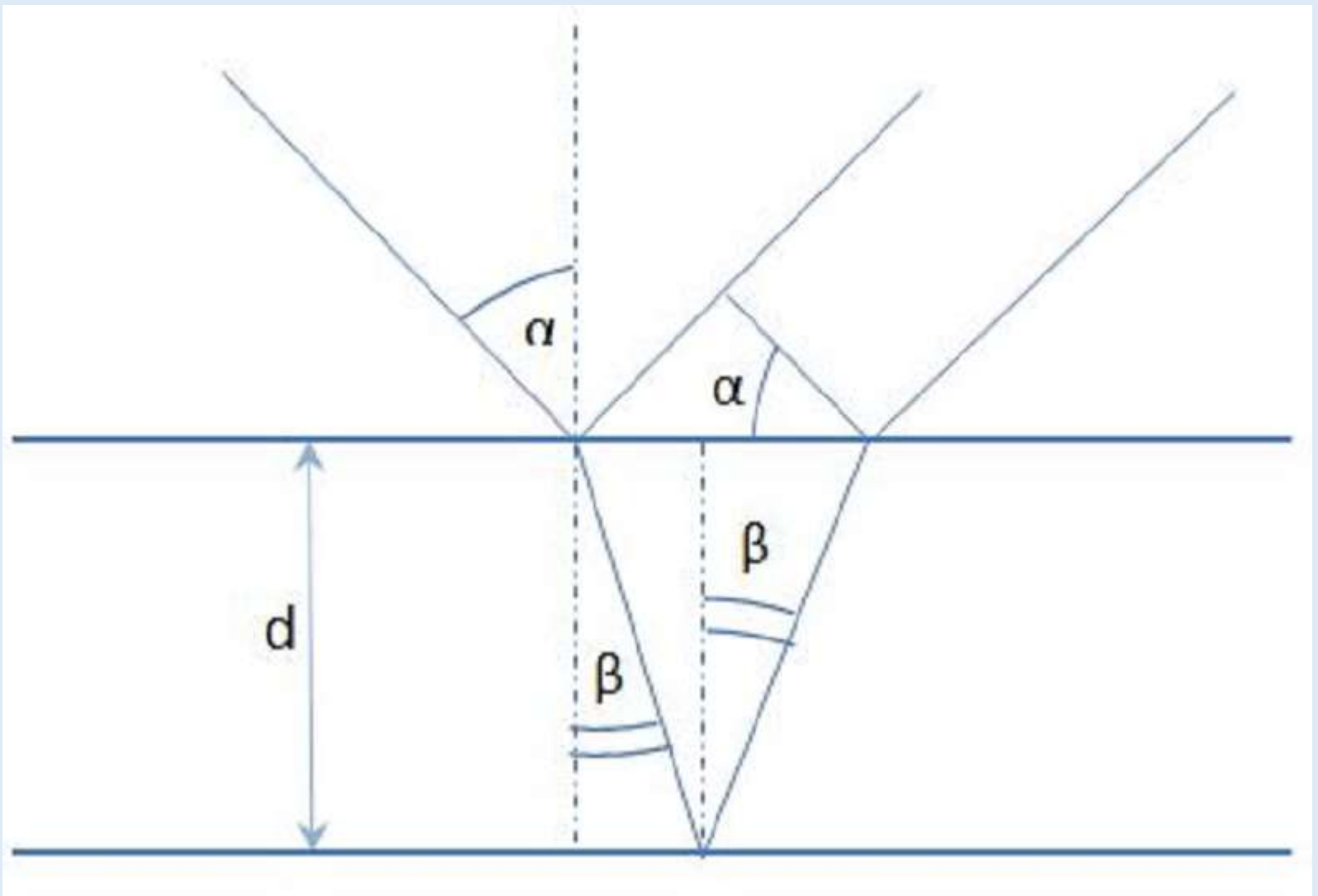


Пропускание ячейки с естественной смесью изотопов рубидия при синхронном сканировании дифракционной решетки и тока ЛД.

## ECDL-8920R\_101584\_MSU\_March\_2016

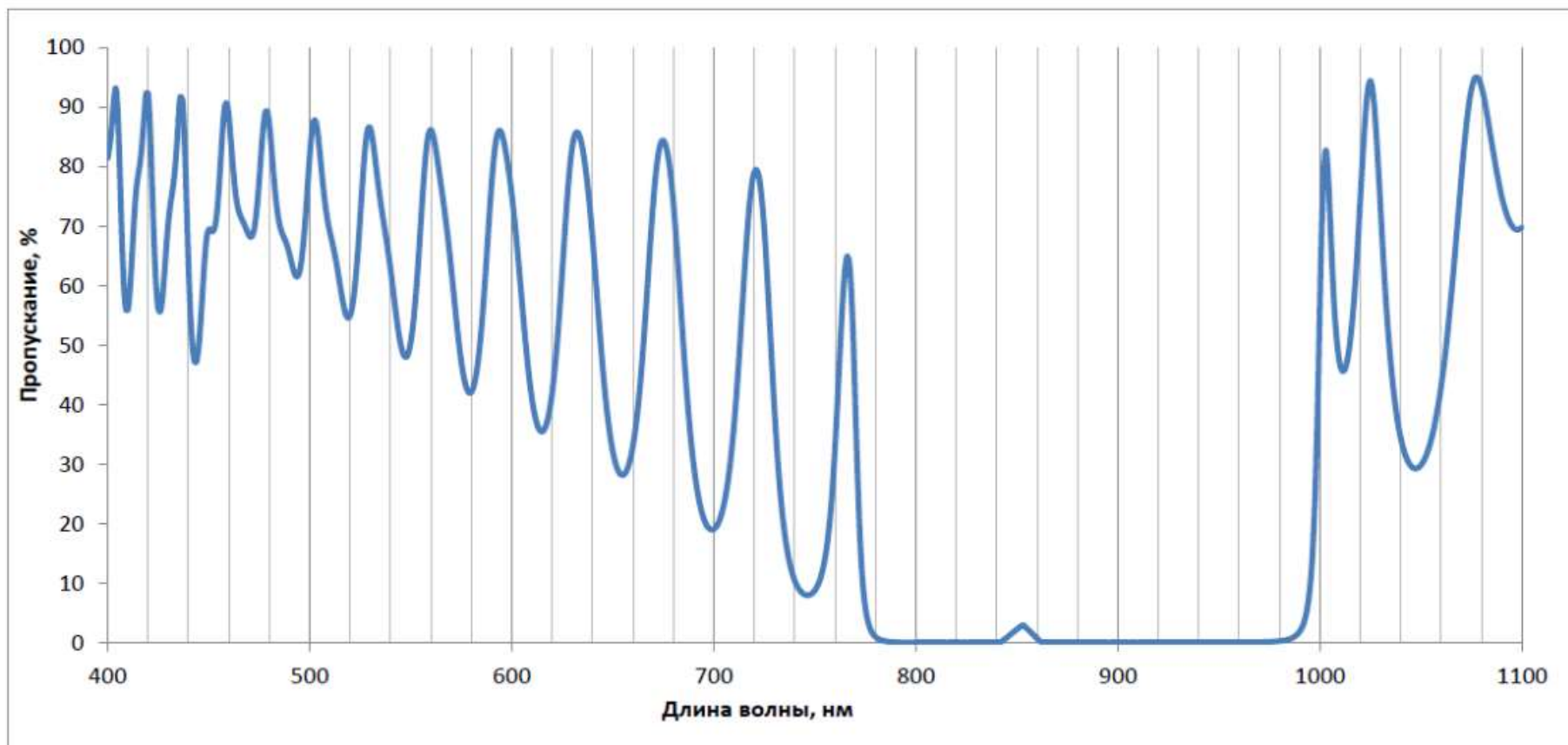


Пропускание ячейки с парами Cs при синхронном сканировании дифракционной решетки и тока ЛД.

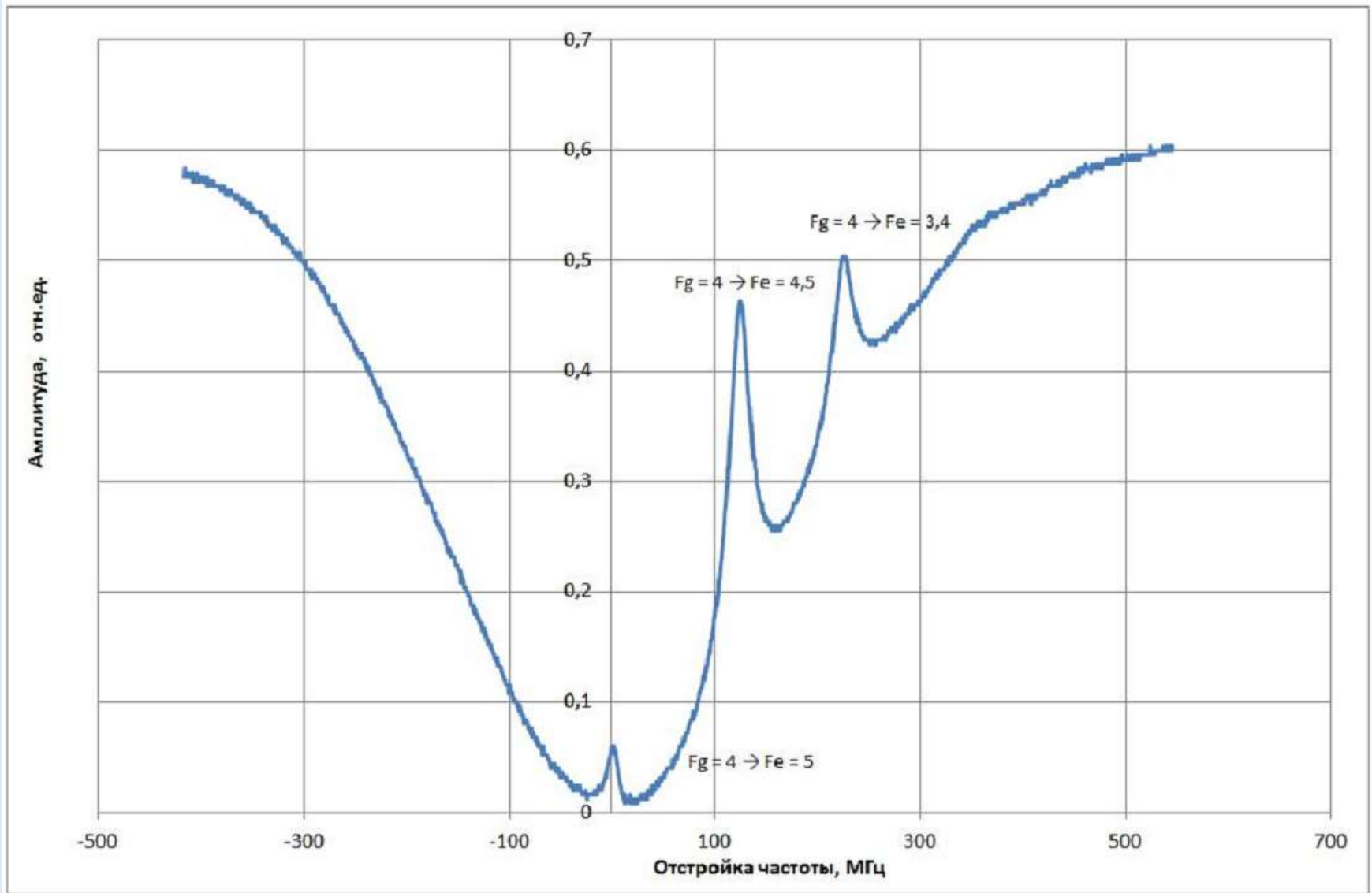


Плоскопараллельная пластинка толщиной  $d$



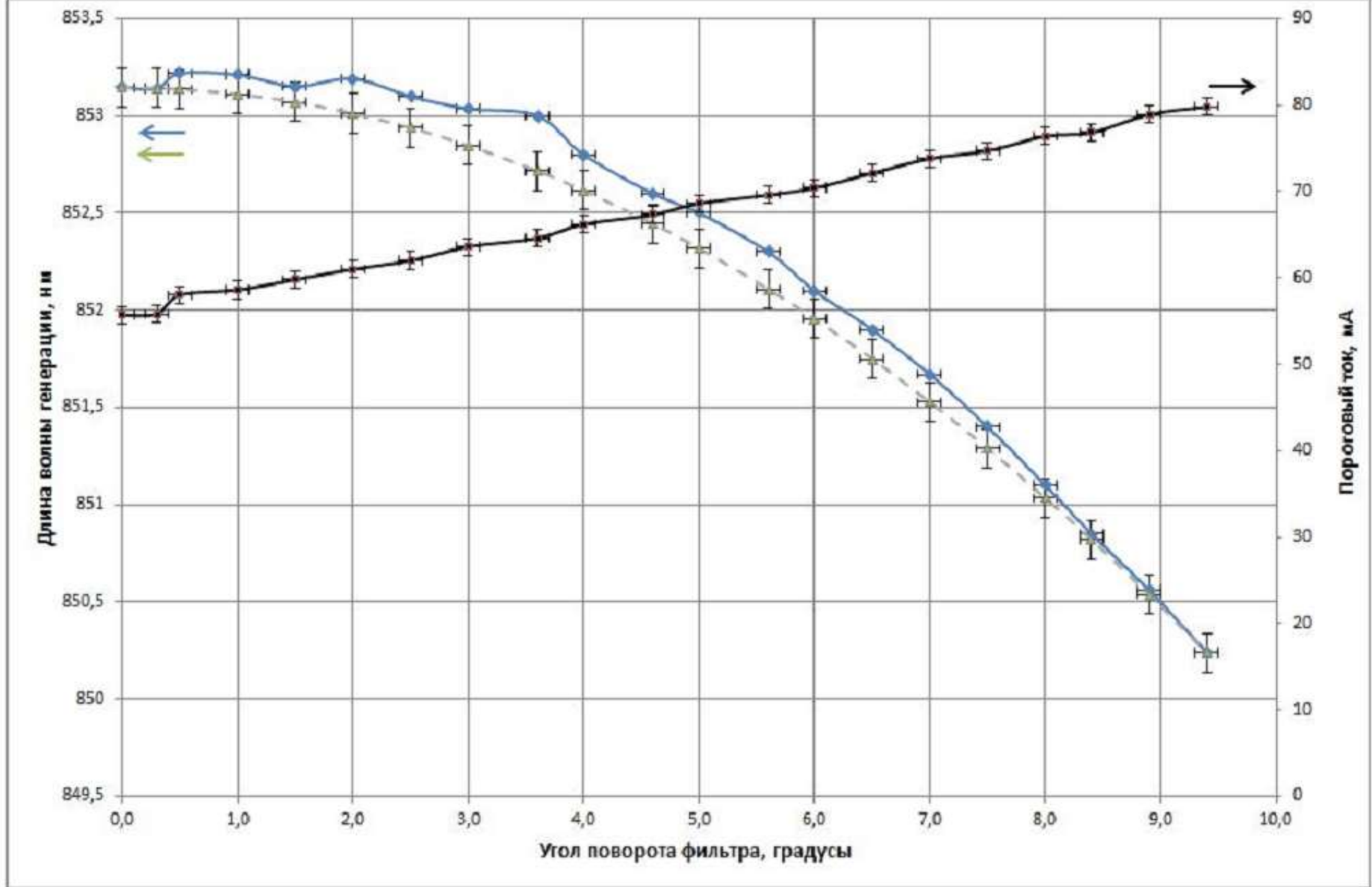


Спектр пропускания интерференционного фильтра №7, полученный с помощью спектрофотометра с разрешением 1 нм

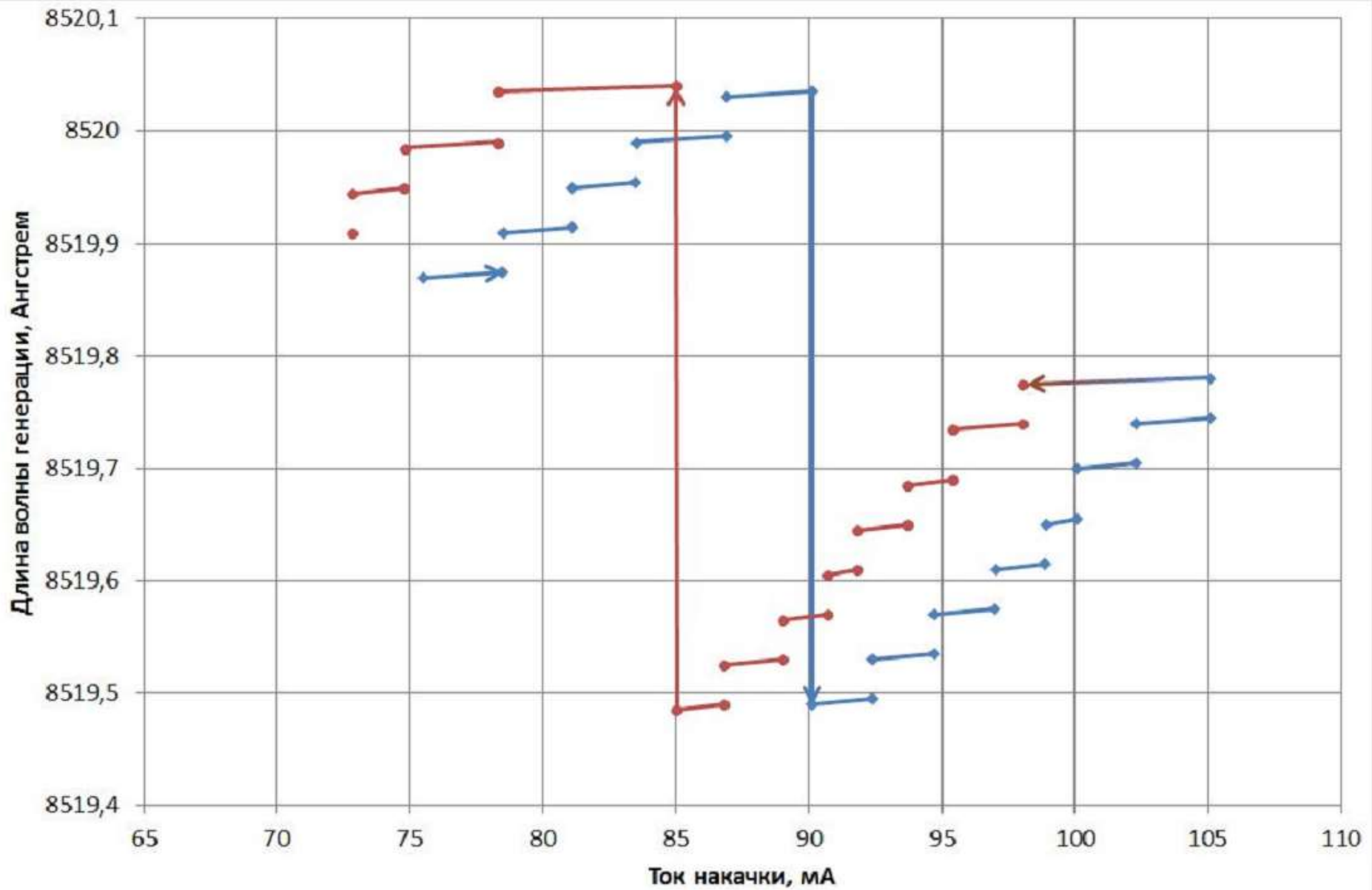


Внутридоплеровские резонансы насыщения поглощения длинноволновой компоненты D2 линии цезия-133, полученные с помощью ДЛВР с ИФ.

Ток накачки диодного лазера — 40 мА, частота сканируется только благодаря пьезокерамике на выходном зеркале

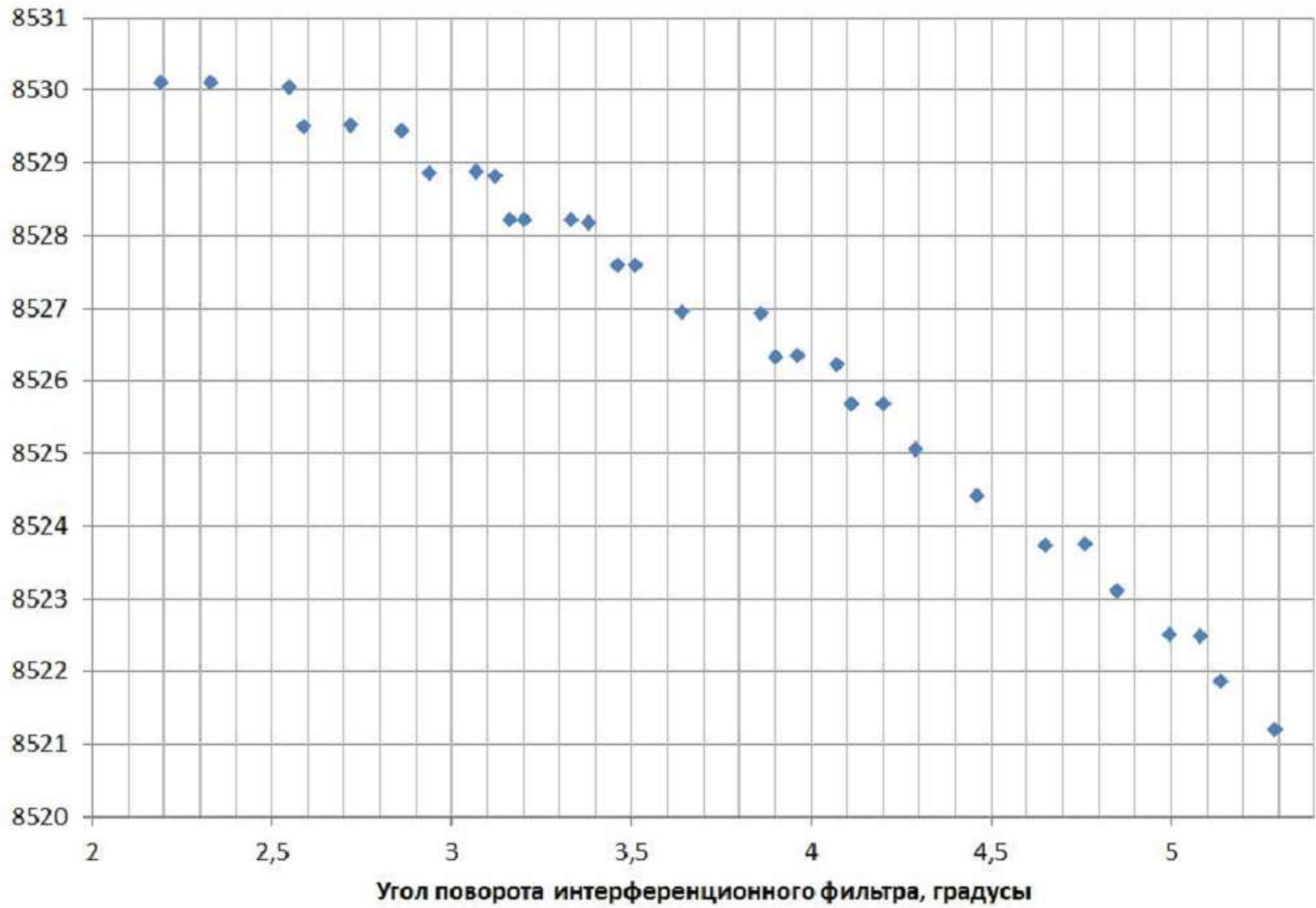


Зависимость порогового тока (черный) и длины волны генерации (синий) ДЛВР от угла поворота ИФ. Зеленым отмечена расчетная зависимость длины волны от угла.

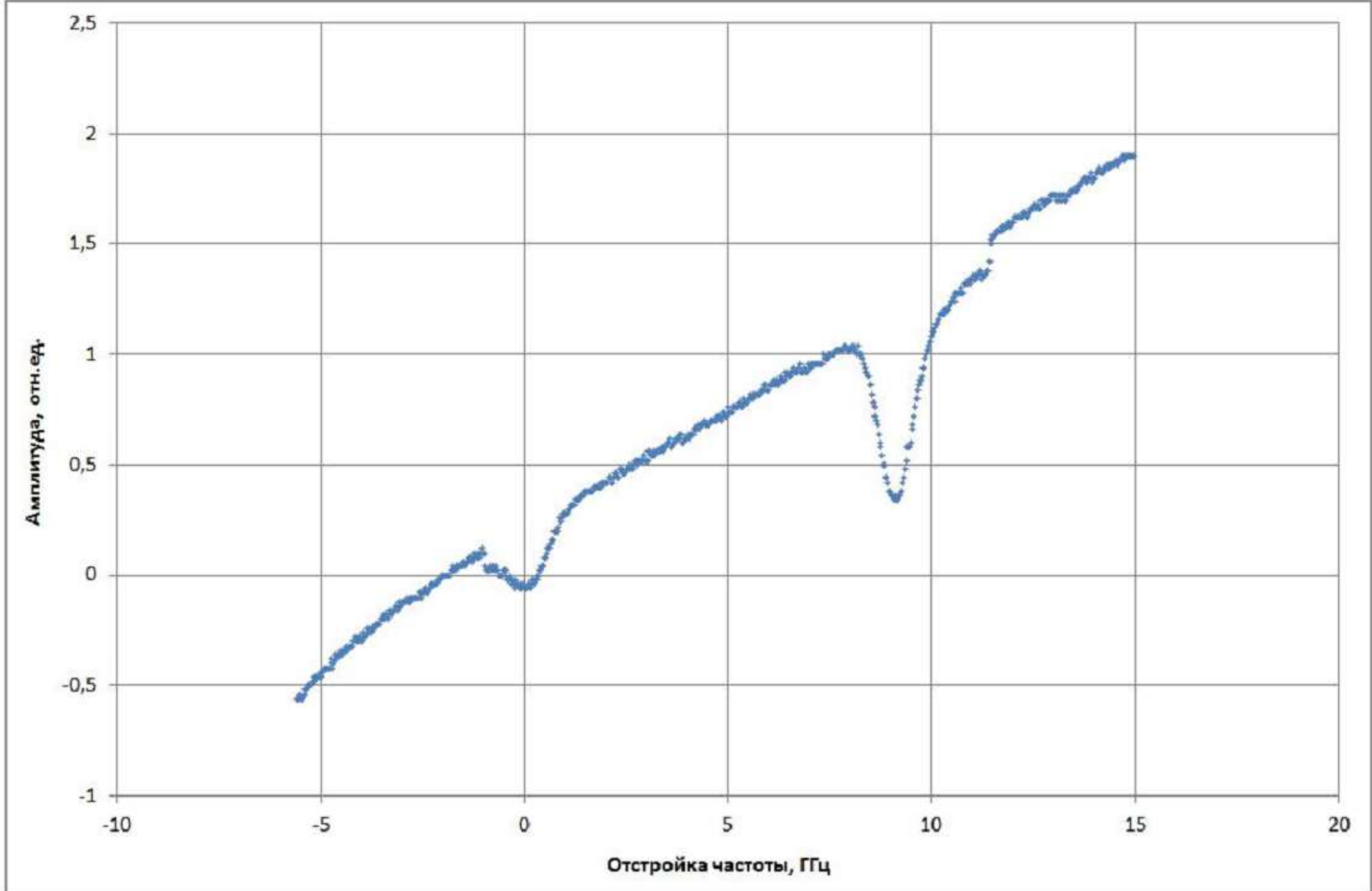


Зависимость длины волны генерации ДЛВР от тока накачки для короткого резонатора

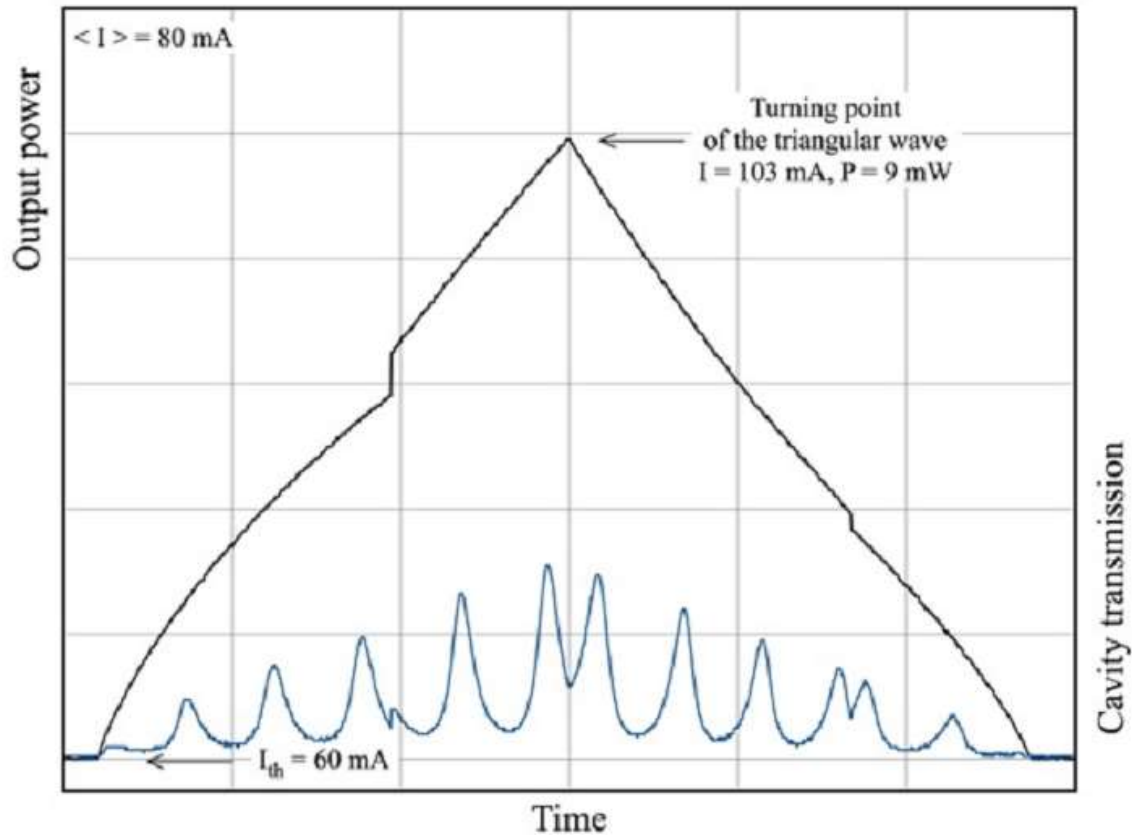
Длина волны генерации, Ангстрем



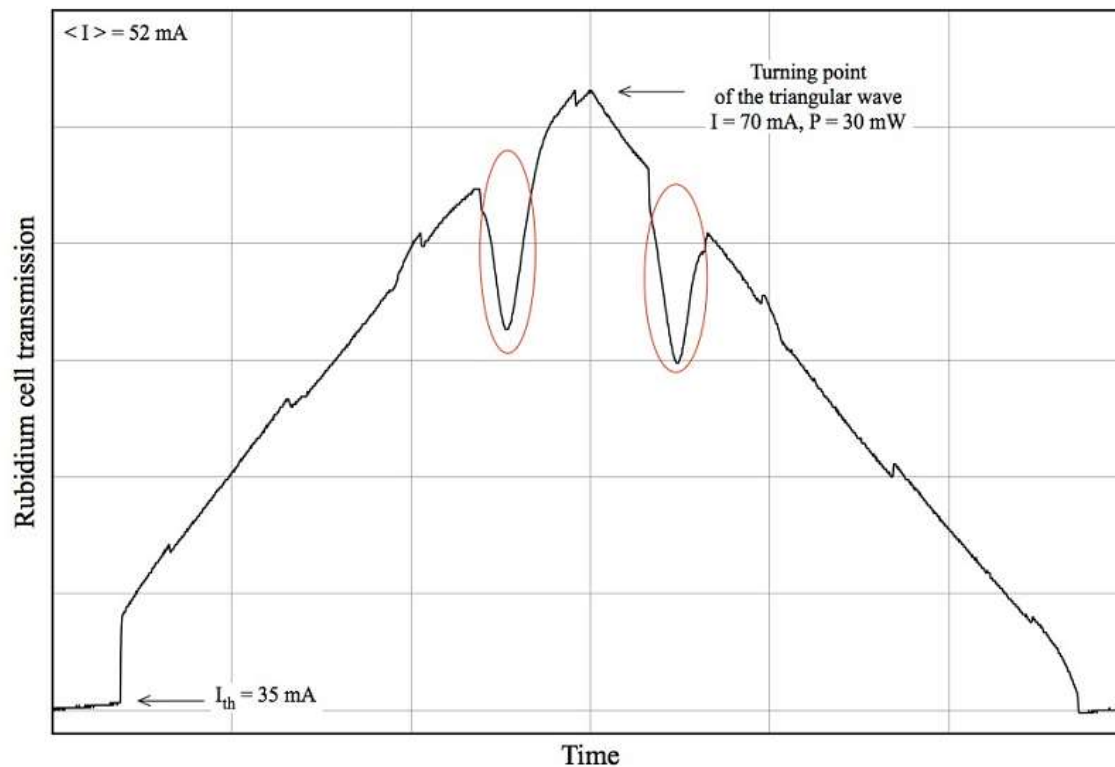
Зависимость длины волны генерации ДЛВР от угла поворота ИФ



Обе компоненты линии D2 Cs-133, полученные с помощью ДЛВР.  
Сканируется длина резонатора и ток накачки

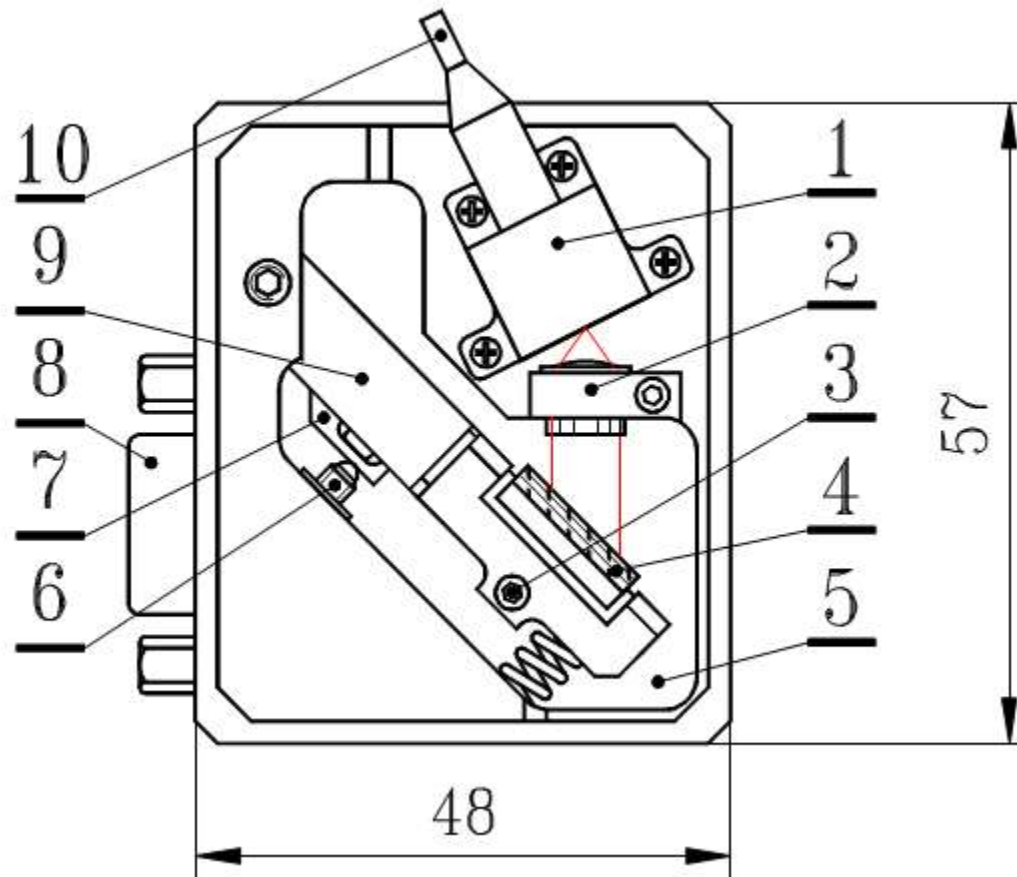


**The dependence of the output power (black curve) and the cavity transmission (blue curve) on the LD current. The LD current is changed by the symmetrical triangular wave.**



**Зависимость выходной мощности лазера от тока инжекции.** Ток лазерного диода модулируется симметричным треугольным сигналом. Зависимость снята при постоянном напряжении на пьезоэлементе. Красные эллипсы выделяют зоны поглощения лазерного излучения в парах Rb.





**Оптическая головка (вид сверху при снятой крышке).** 1 – оптический модуль SAF1174S; 2 – коллимирующий объектив; 3 – вертикальный фиксирующий винт M2; 4 – дифракционная решетка, укрепленная на горизонтальном валу; 5 – корпус оптической головки; 6 – горизонтальный юстировочный винт M3x0,25; 7 – пьезоэлемент; 8 – разъем DHS-15F; 9 – подвижный рычаг; 10 – волоконный выход.