

ЦЕЗИЕВЫЕ СПИНОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С НАКАЧКОЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А.Н. Козлов³, Е.В. Живун^{1,2}, В.В. Васильев¹, В.Л. Величанский^{1,2}, С.А. Зибров¹,
А.В. Климаков^{1,2}, А.В. Сивак, В.П. Яковлев³

¹ ФИАН, ² МИФИ, ³ ИЗМИРАН
Москва

ПЛАН

ВВЕДЕНИЕ

- Двойной радиооптический резонанс
- Магнитометр с оптической накачкой (**МагнОН**) и спиновый генератор
- Применения МагнОНов и преимущества лазерной накачки
- Проблемы лазерной накачки и цель работы (**НИША**)

МЕТОДИКА

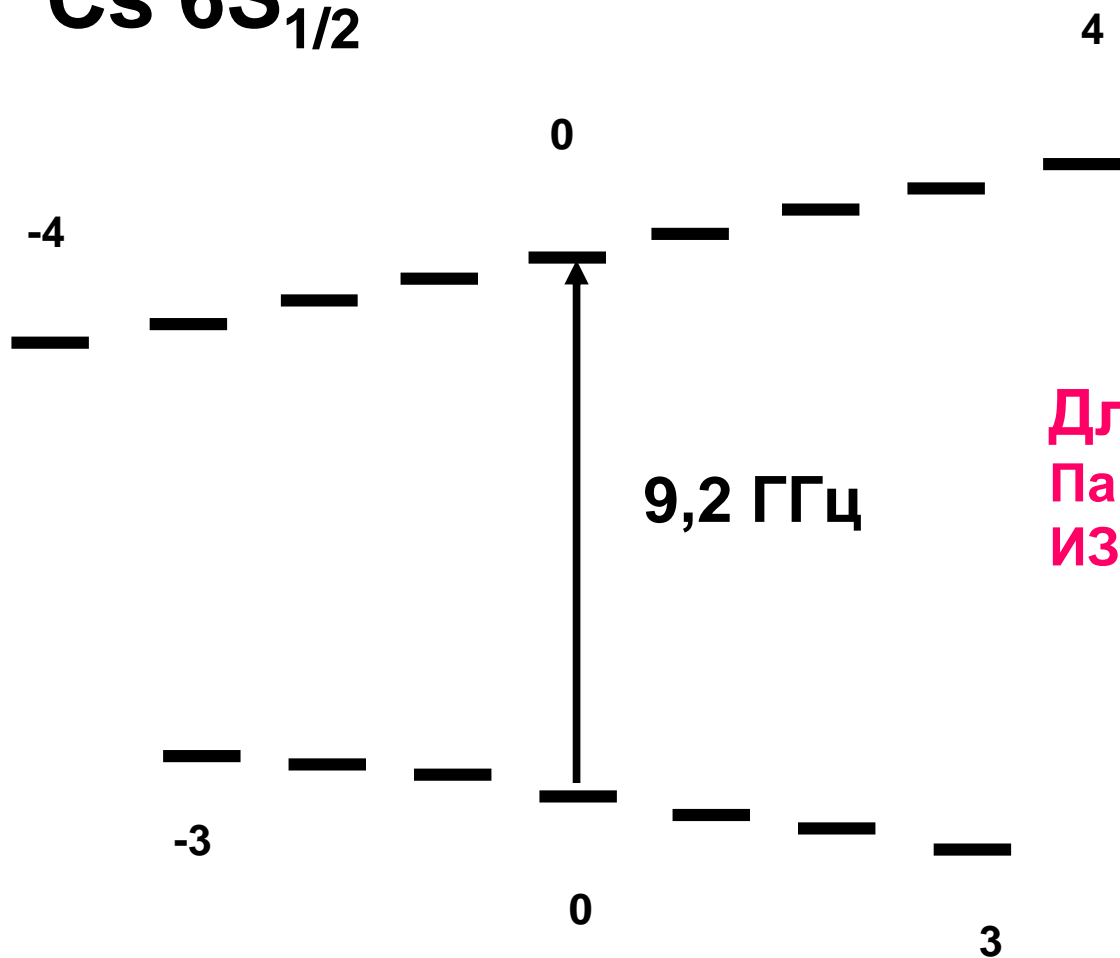
- Лазеры
- Накачка одним и двумя лазерами
- Гетеродинная спектроскопия
- Шумовая спектроскопия

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

- Оптимальные переходы
- Оптимальная настройка
- Проблемы и десерт

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Cs $6S_{1/2}$



$F = 4 = 7/2 + 1/2$

$\Delta_4 = 181860$ Гц

**Для $B=52$ мкТ (0,52 Гс)
Павильон сверок,
ИЗМИРАН**

$F = 3 = 7/2 - 1/2$

$\Delta_3 = 182440$ Гц

$\Delta_{34} = 580$ Гц

**Зеемановское расщепление подуровней
основного состояния $F_g=3,4$ в слабом поле:**

$$h^{-1} \Delta E_4 = \Gamma_4 B - (2m_4 - 1)GB^2$$

$$h^{-1} \Delta E_3 = \Gamma_3 B + (2m_3 - 1)GB^2$$

$$\Gamma_3 = 350854 \text{ Гц/Гс}$$

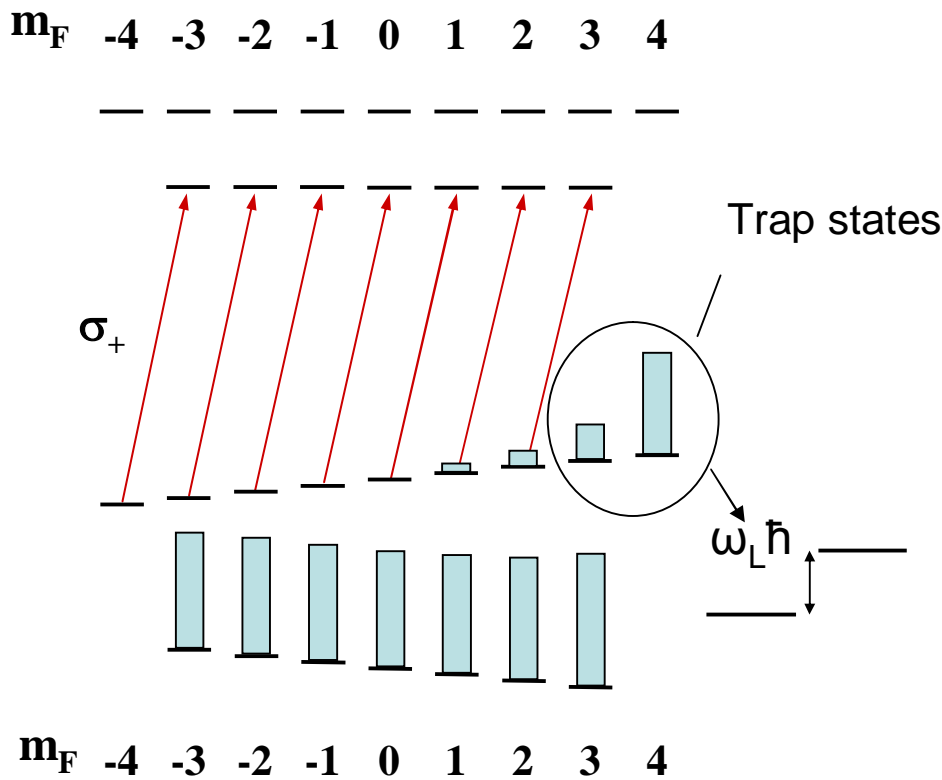
$$\Gamma_4 = 349731 \text{ Гц/Гс}$$

$$G = 13,3 \text{ Гц/Гс}^2$$

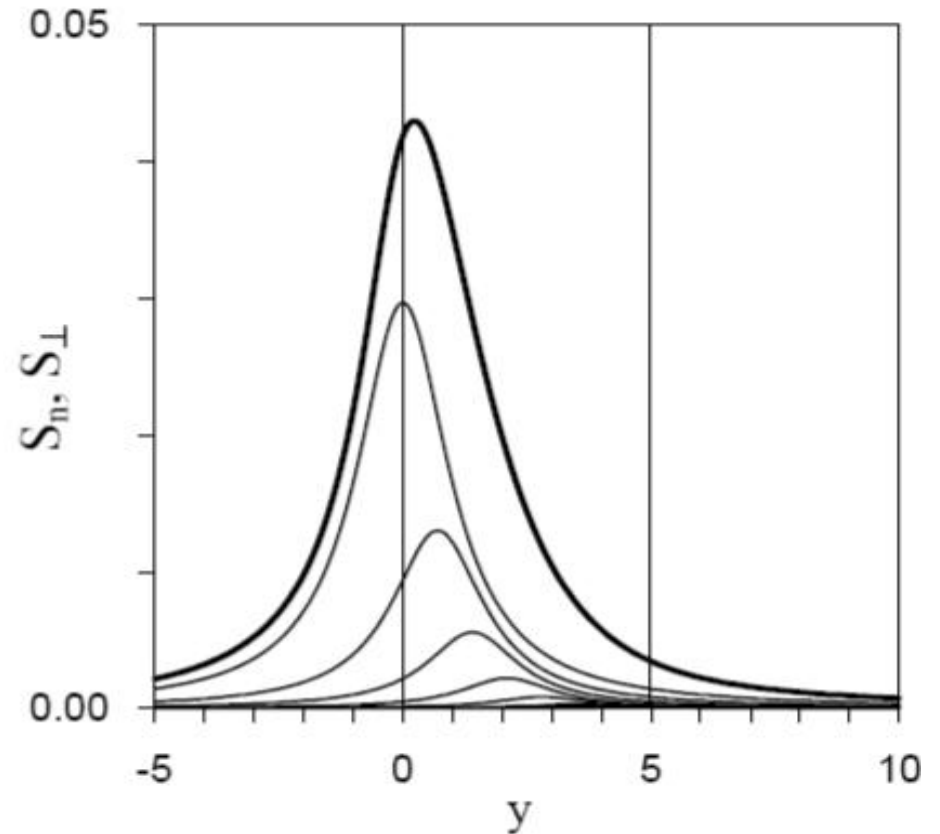
The main goal is to study the possibility of laser use for optical pumping of OPM in the terrestrial magnetic fields and to figure out the most efficient excitation transition.

Polarization by optical pumping

D1 4-3'

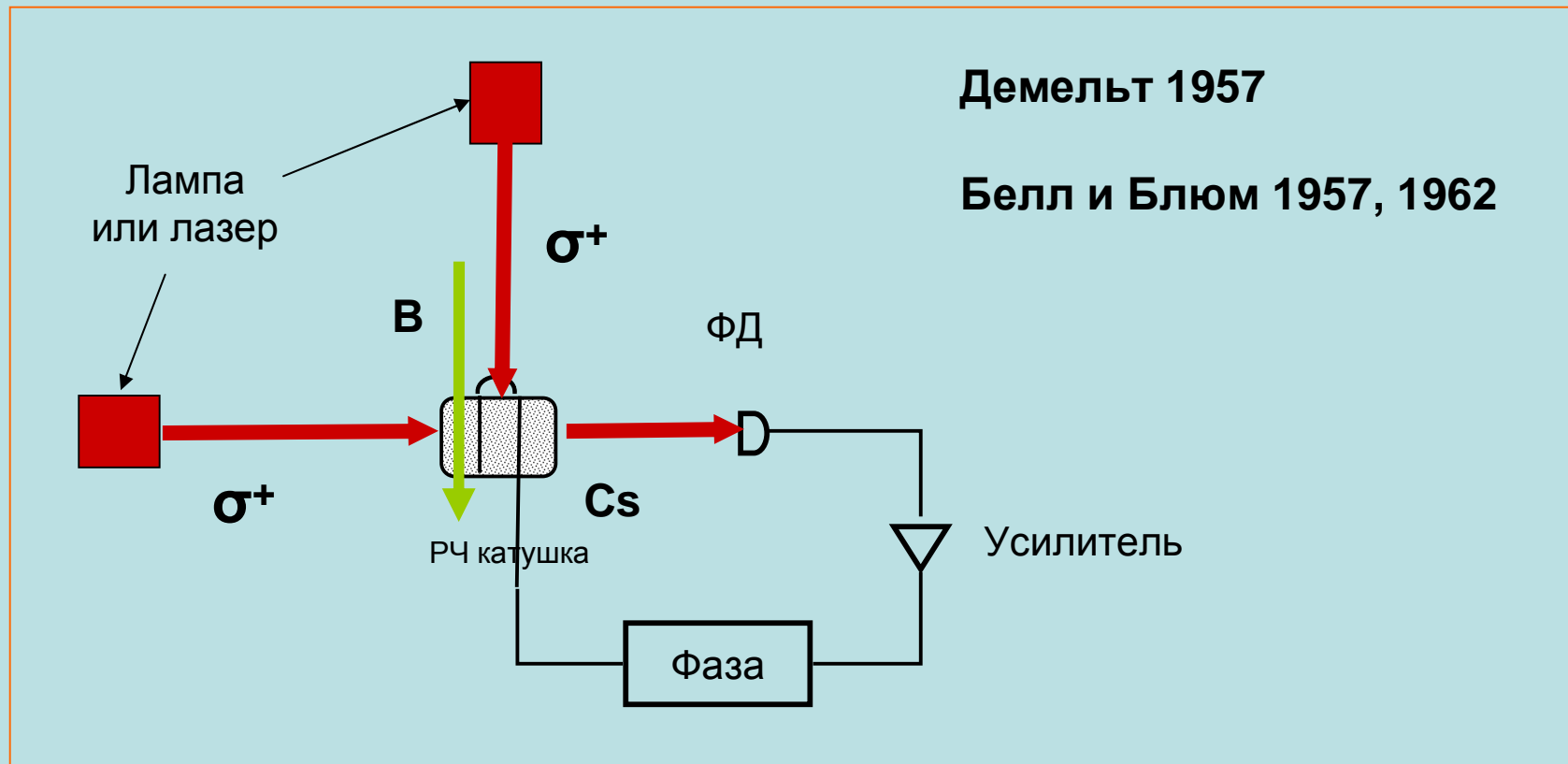


Laser emission interacts with one hyperfine ground level

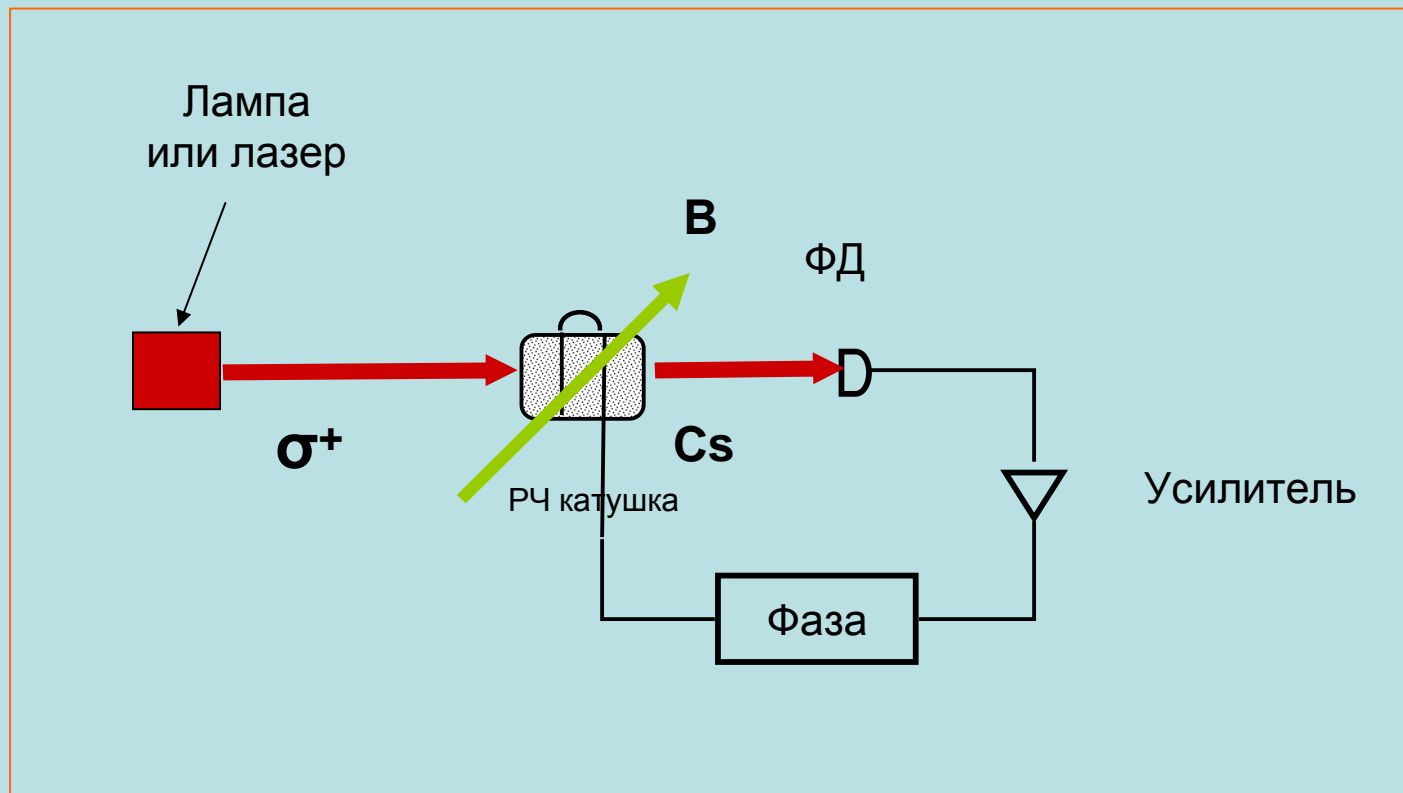


Resonance curve asymmetry due to quadratic Zeeman shift

- Магнитометры с оптической накачкой измеряют частоту Ларморовской прецессии магнитного момента атомов ω_L в магнитном поле B .
- В наиболее распространенных M_x магнитометрах используется спиновый генератор, работающий на Ларморовской частоте



Чаще в магнитометрах один источник выполняет обе функции:
и накачки и детектирования.
Магнитное поле должно быть под углом к лазерному лучу.



НАКАЧКА

- Традиционно (до сих пор в коммерческих магнитометрах) оптическая накачка производится резонансным излучением тех же атомов («лампа»).

ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКИ

- Больше степеней свободы при управлении спектром и геометрией пучка
- Выше эффективность и спектральная яркость
- Возможность использования волоконных световодов и разветвителей
- Большой срок службы лазеров (особенно VCSEL)

ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МагнОН И ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКИ

НАУКА - ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СИММЕТРИИ (ЭДМ электрона-P,T inv)

Мощность, спектр. Яркость. В МагнОнах без спин-обменной релаксации предельная чувств.: сейчас 10^{-15} Т/Гц^{1/2}, ожидается до 10^{-17} Т/Гц^{1/2}

БИОЛОГИЯ, СЕРДЦЕ*, МОЗГ

Волоконный световод, разветвление, **много каналов с одним лазером**

ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА*, АРХЕОЛОГИЯ* – уменьшение на порядок энергопотребления с повышением в разы чувствительности и срока службы

ФИЗИКА ЗЕМЛИ*, ПРЕДСКАЗАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

МИНЫ, СНАРЯДЫ, ПОДВОДНЫЕ ЛОДКИ

100 – 1 пТ

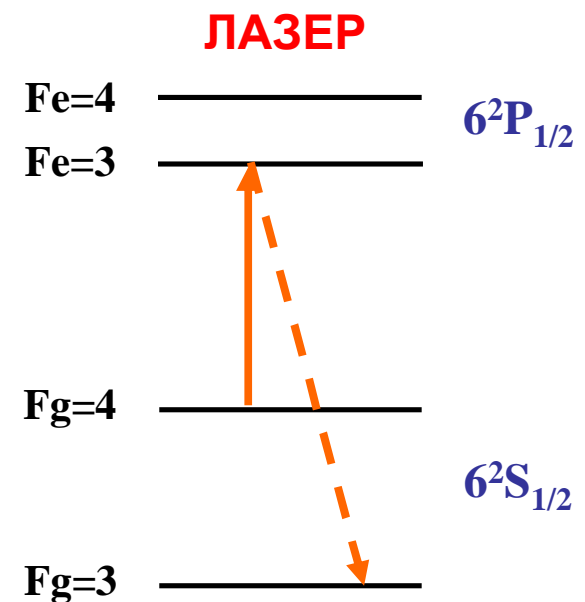
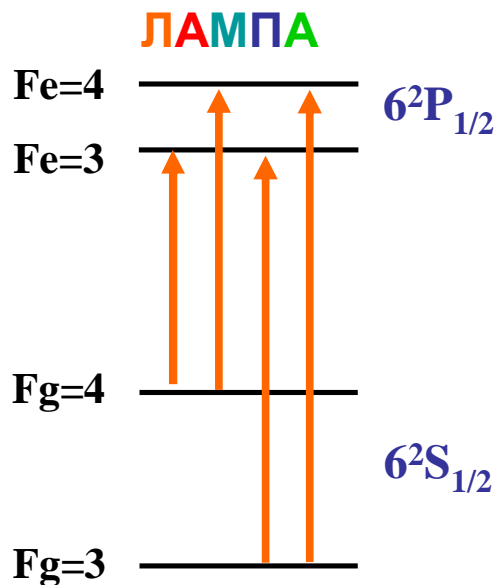
(10^{-10} – 10^{-12})Т

(1 – 0,01) мкГс

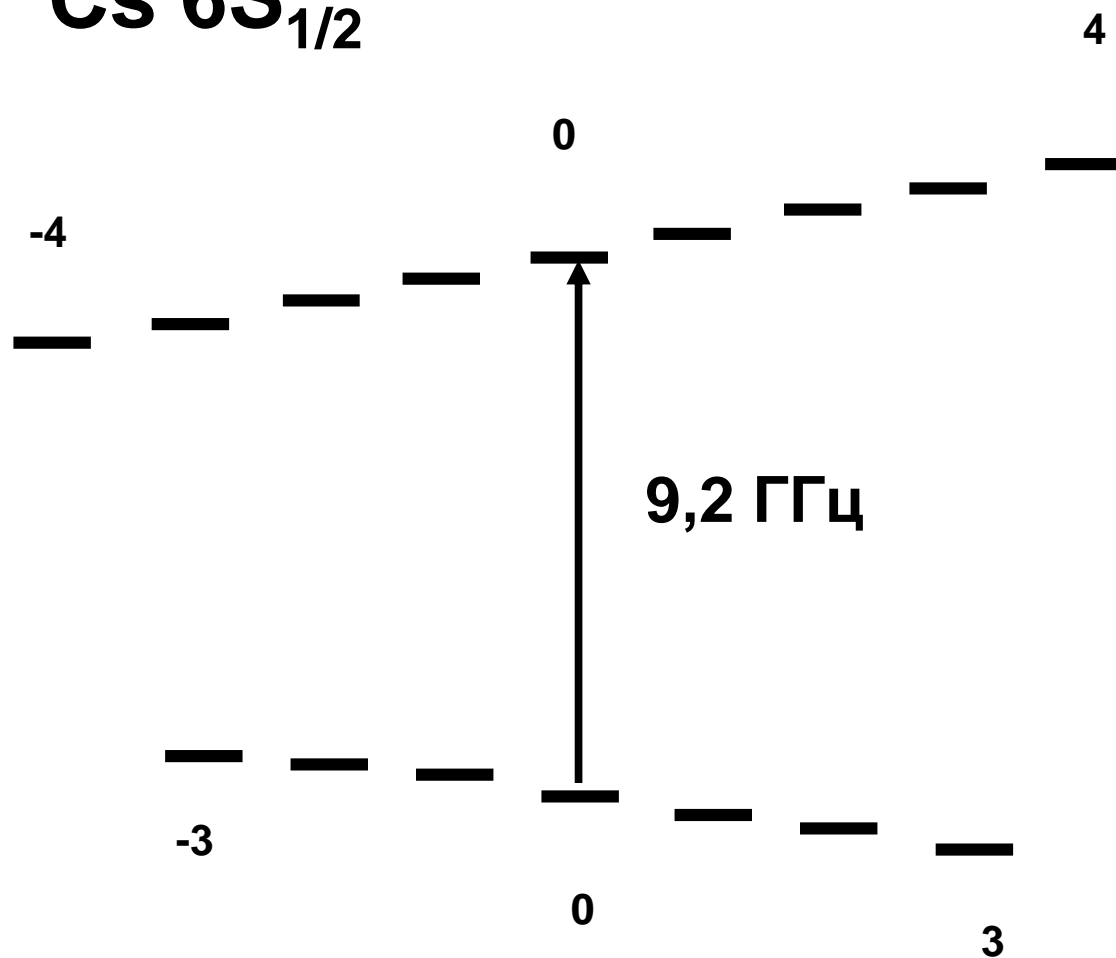
ЦЕЛЬ : создание спиновых генераторов на атомах цезия с накачкой ДЛ и разработка на их основе магнитометров, работающих в земном поле для геологоразведки и магнитной кардиографии

НЕДОСТАТКИ ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКИ:

- сверхтонкая накачка при использовании одного ДЛ (два ДЛ или СВЧ)
- избыточные шумы (зависят от типа лазера и ШЛГ)
- перестройка (дрейф) частоты, алгоритм настройки (стабилизация)



Cs $6S_{1/2}$



$$F = 4 = 7/2 + 1/2$$

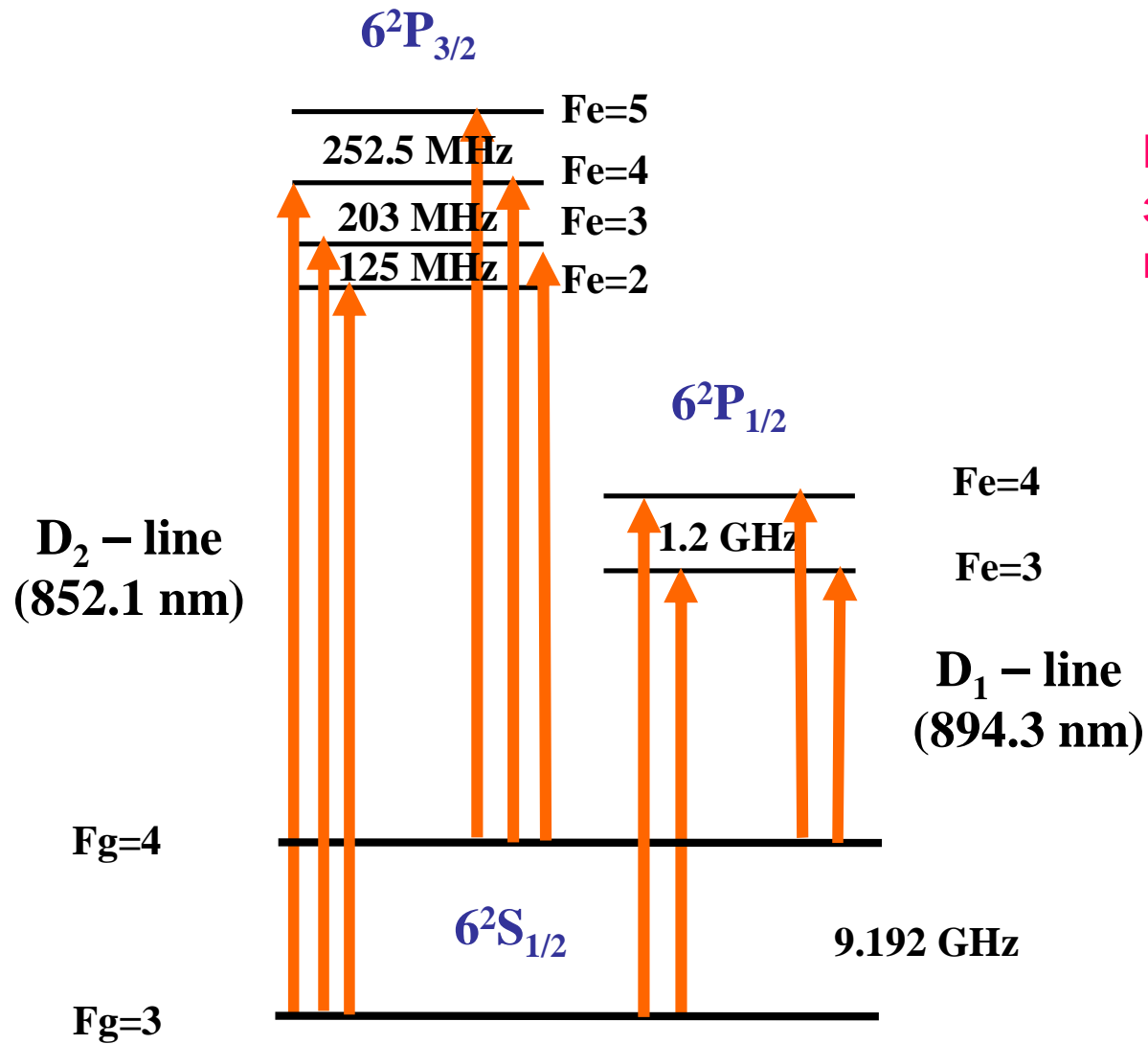
$$\Delta_4 = 181860 \text{ Гц}$$

$$F = 3 = 7/2 - 1/2$$

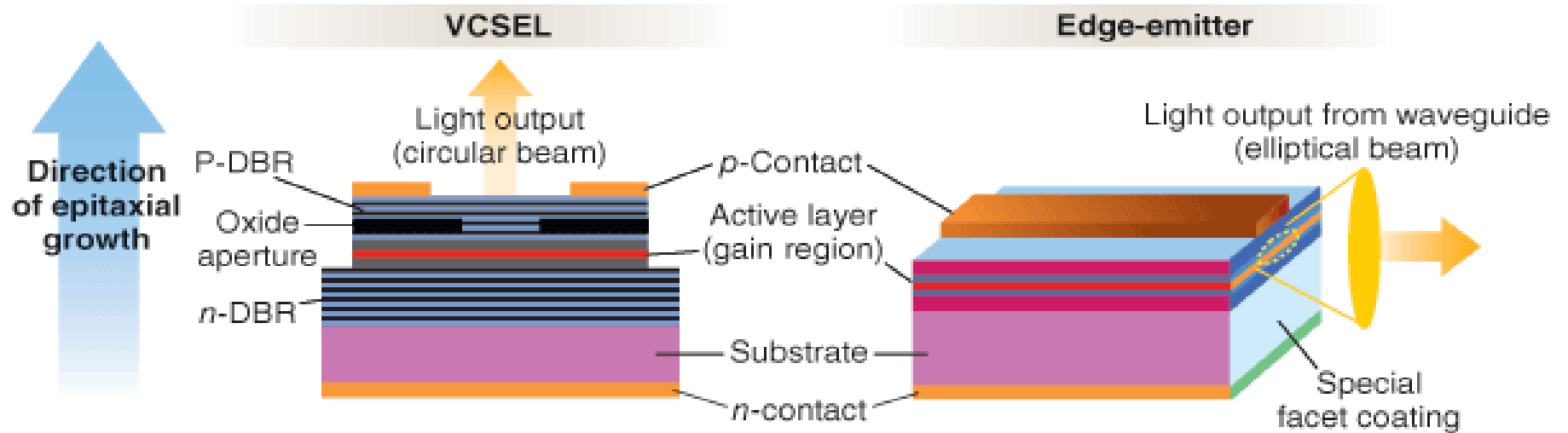
$$\Delta_3 = 182440 \text{ Гц}$$

$$\Delta_{34} = 580 \text{ Гц}$$

Схема резонансных переходов в ^{133}Cs



Наиболее
эффективный
переход?



Лазер, излучающий с поверхности
 (с «вертикальным» резонатором)

Лазер, излучающий с краев
 (традиционная геометрия)

ТИПЫ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ (ДЛ)

ЛАЗЕРЫ, ИЗЛУЧАЮЩИЕ С КРАЕВ

| | | L (мкм) | $\Delta\nu$ (МГц) |
|----|---|----------|-------------------|
| 1. | «Обычные» | 400-600 | 10-30 |
| 2. | С распределенным Брэгг. отражателем | 600-1000 | 5-10 |
| 3. | С «коротким» резонатором | 50-100 | 10-30 |
| 4. | С внешним открытым резонатором | 3-5 см | 1 |
| 5. | С внешним волоконным резонатором с Брэгговской решеткой | 10-30 см | 2 |

ЛАЗЕРЫ, ИЗЛУЧАЮЩИЕ С ПОВЕРХНОСТИ (VCSEL)

| | | | |
|----|-----|---|--------|
| 6. | ULM | 5 | 10-100 |
|----|-----|---|--------|



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

Ширина линии **< 1 MHz**

Мощность **10 mW**

Диапазон непрерывной перестройки

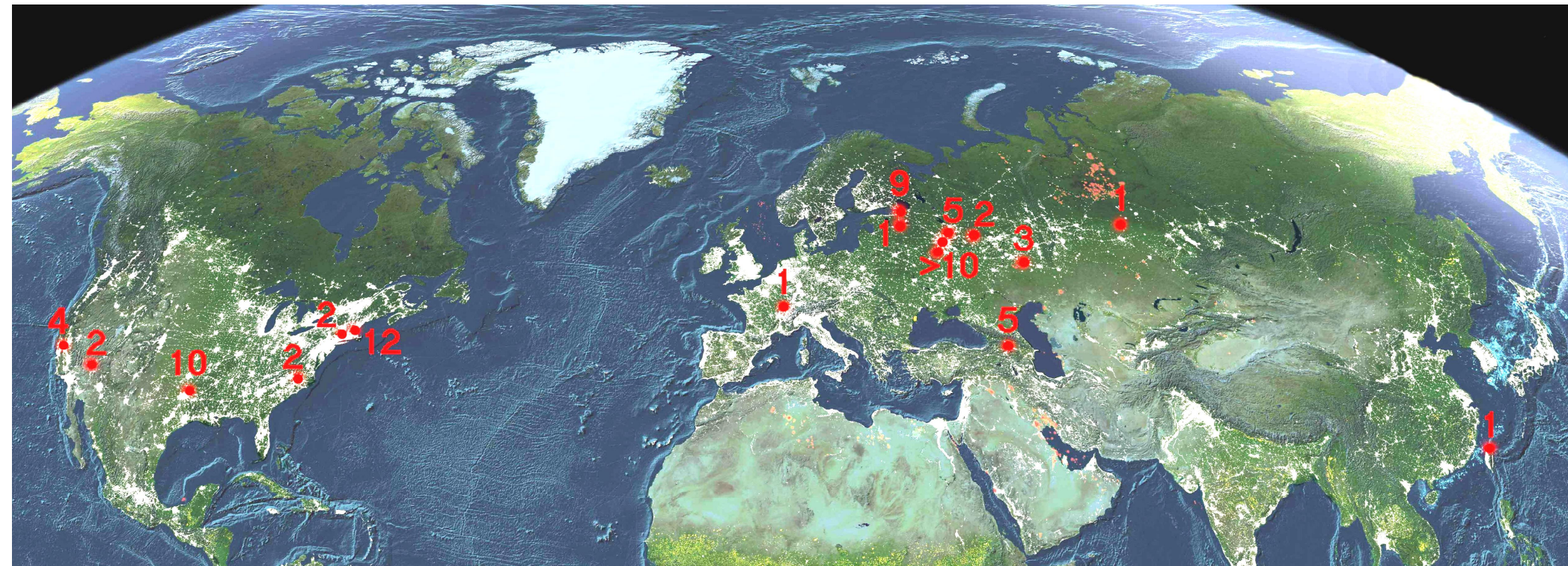
Только PZT **>6 GHz**

PZT и ток накачки **>30 GHz**

Грубый диапазон перестройки **2nm**

США - 30 шт.; Россия > 40шт **V.V.Vassiliev:** vvv@okb.lpi.troitsk.ru

S.A. Zibrov



Linewidth < 1 MHz
Output power 10 mW

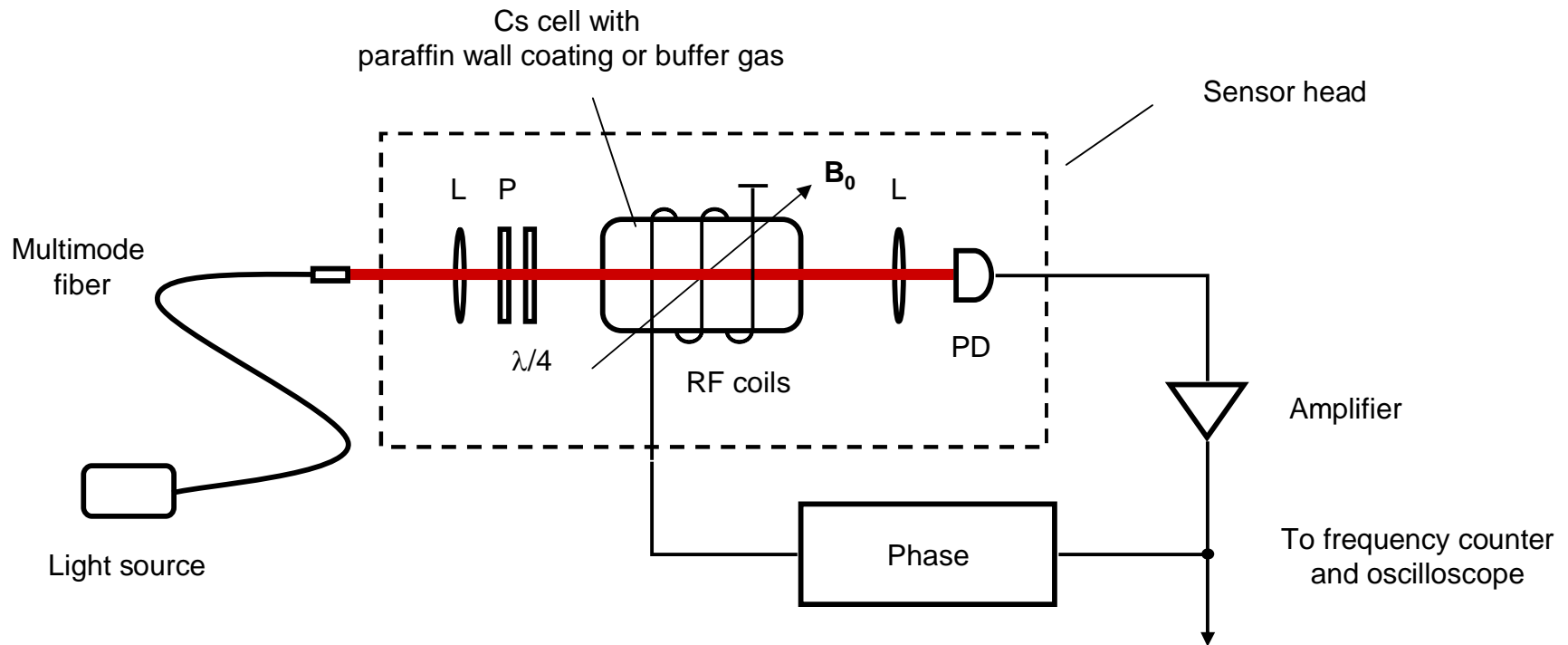
Continuous tuning range
with PZT only >6 GHz
with PZT and current >30 GHz

Coarse tuning range 2 nm

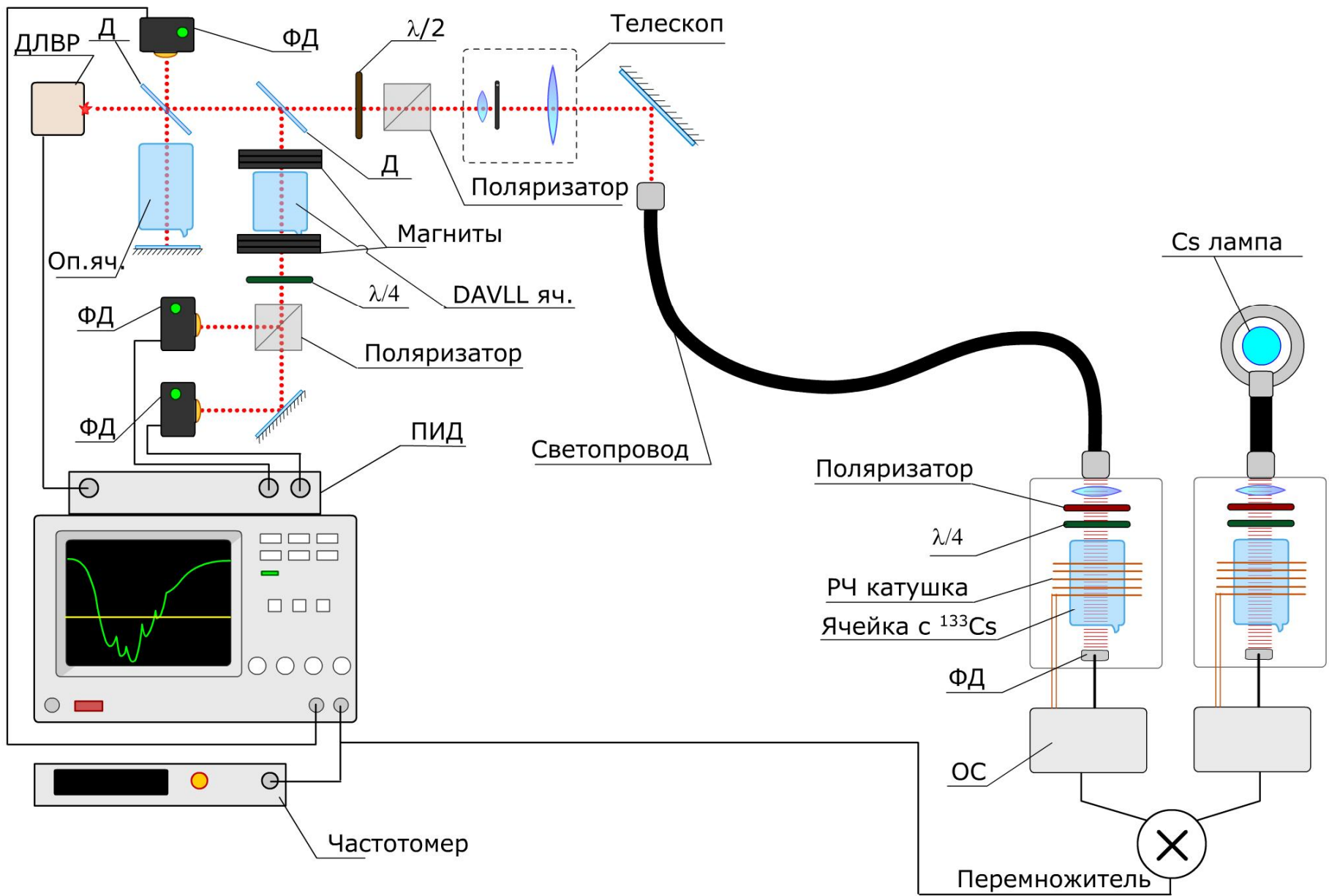
V.V.Vassiliev: vvv@okb.lpi.troitsk.ru

Principal scheme of the Mx magnetometer

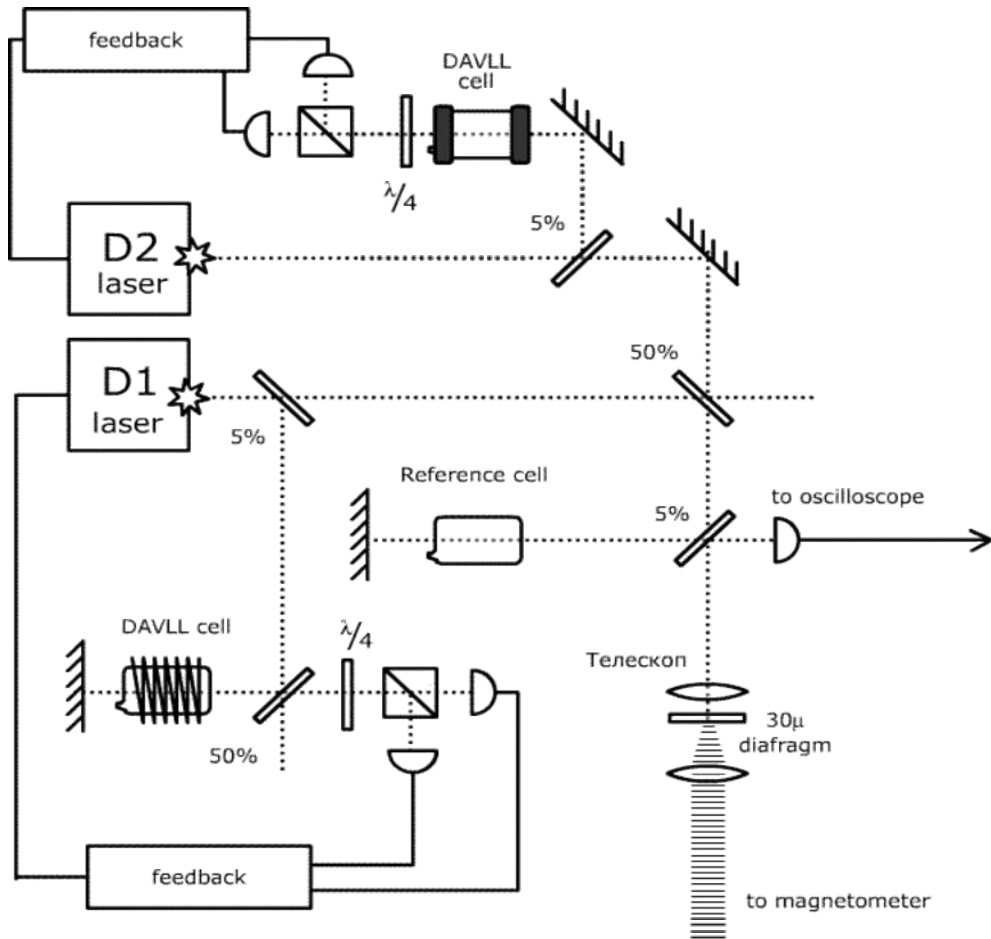
Mx or 45° configuration: MF to be measured (B_0) is oriented at 45° with respect to the laser beam



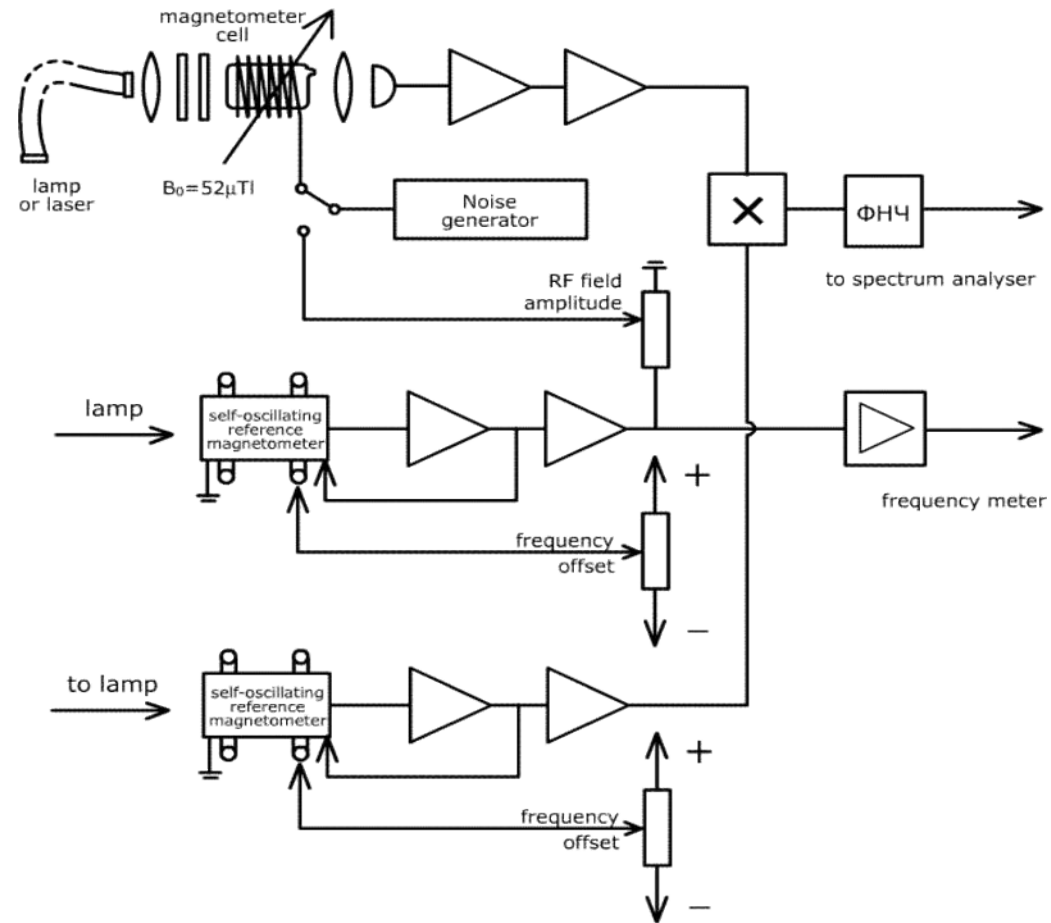
L – lens, P – polarizer, $\lambda/4$ – quarter-wave plate, PD – photodiode
Light source – ECDL, gas discharge lamp, or solitary short cavity DL



Principal scheme of the experimental setup



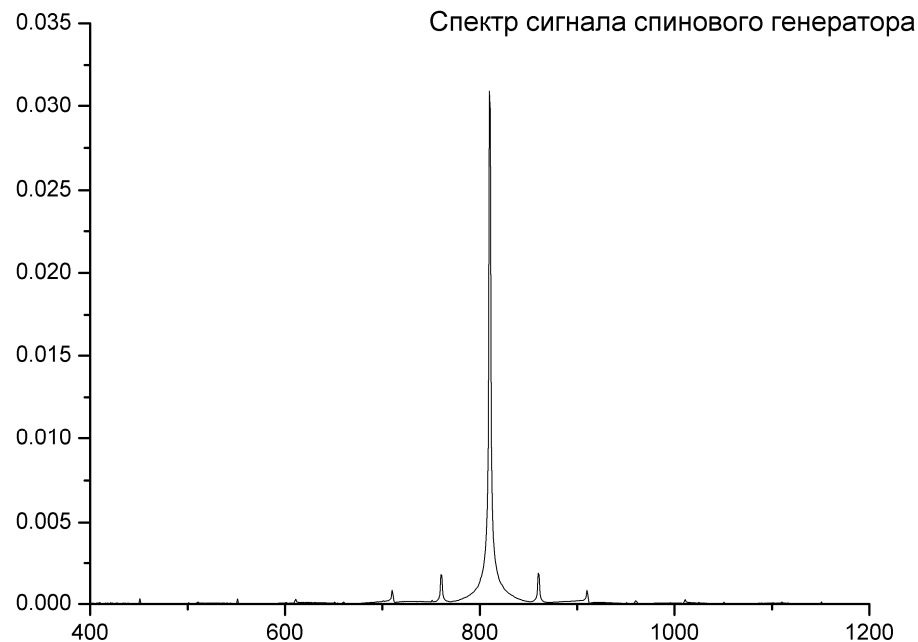
Optical scheme



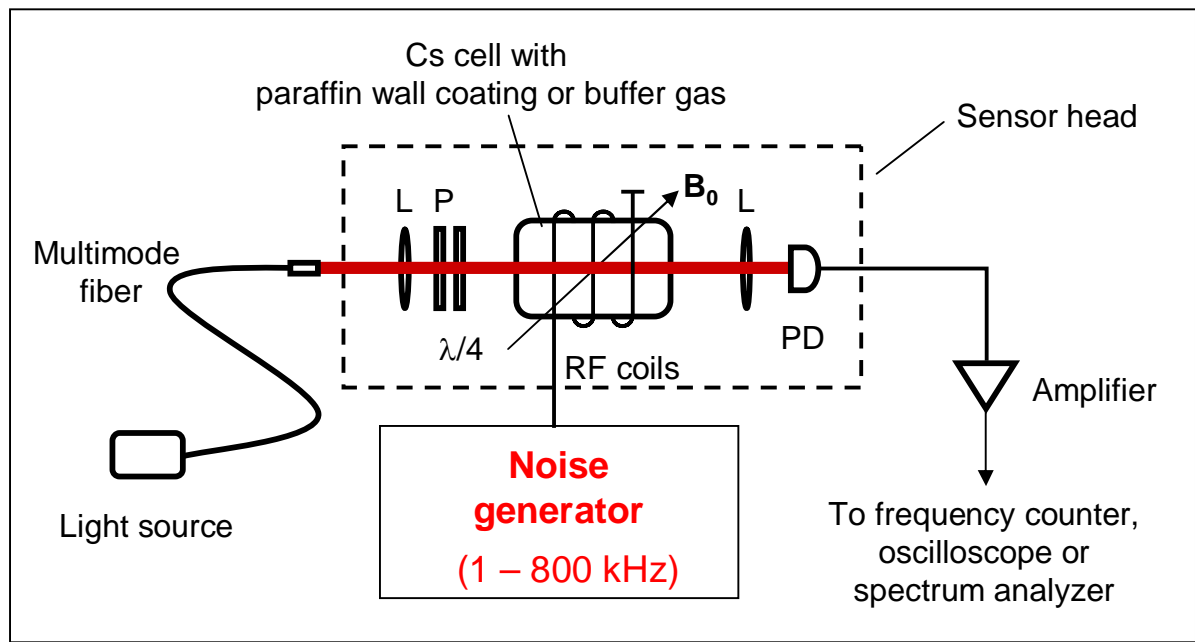
Electronic scheme



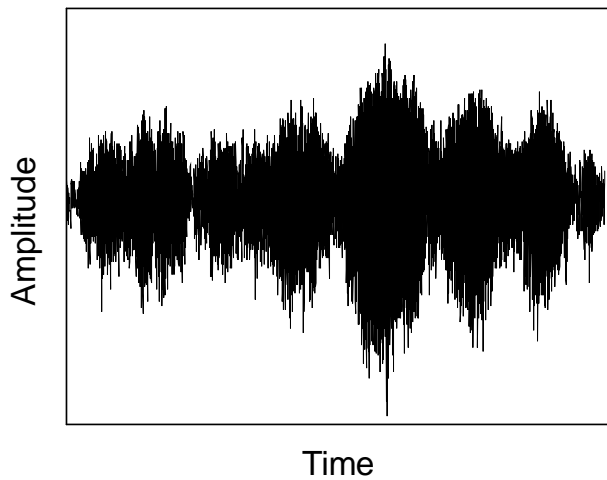
Сигнал, полученный с внешним независимым генератором



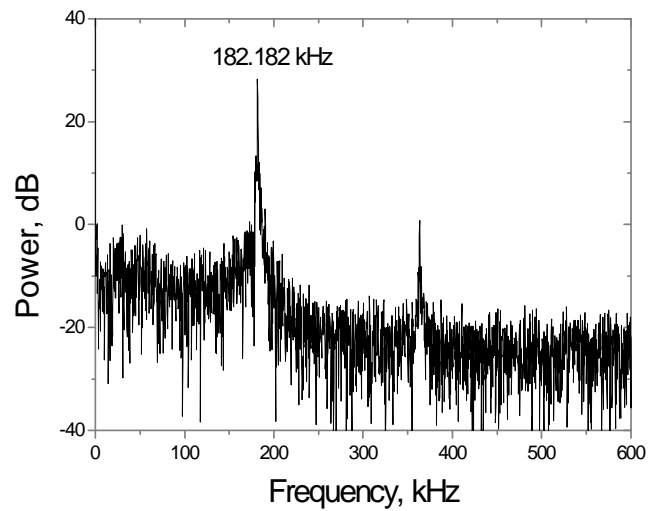
Сигнал, полученный со вторым спиновым генератором



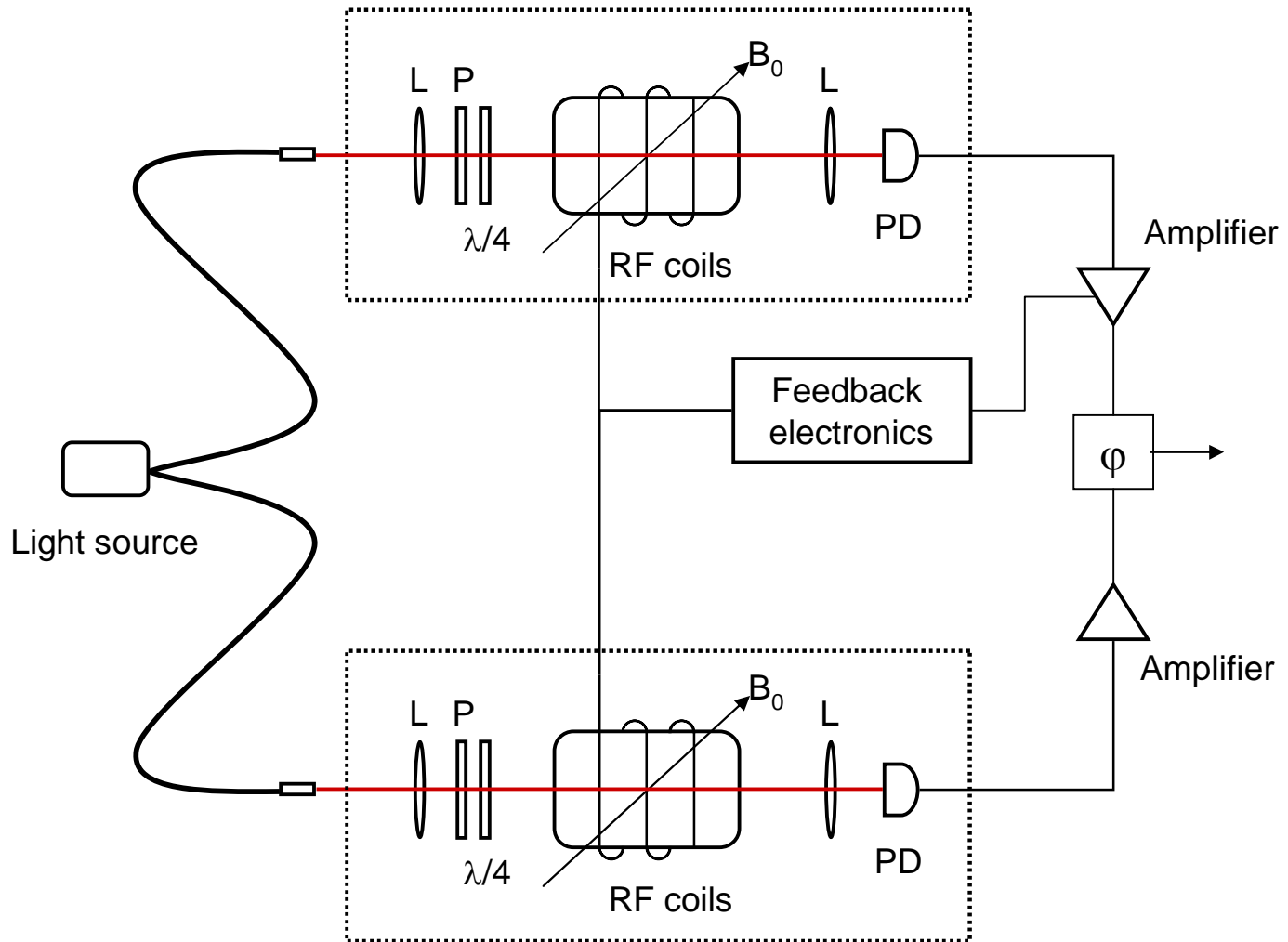
Time domain



FFT



Gradiometer



Excitation by extended cavity diode laser (coated cells)

| Transition $F_g \leftrightarrow F_e$ | Self-oscillation |
|--------------------------------------|------------------|
| 4 ↔ 3 | yes |
| 4 ↔ 4 | no ? |
| 3 ↔ 3 | no |
| 3 ↔ 4 | no |

Amplitude of 40mV was reached when the photocurrent of PD was:

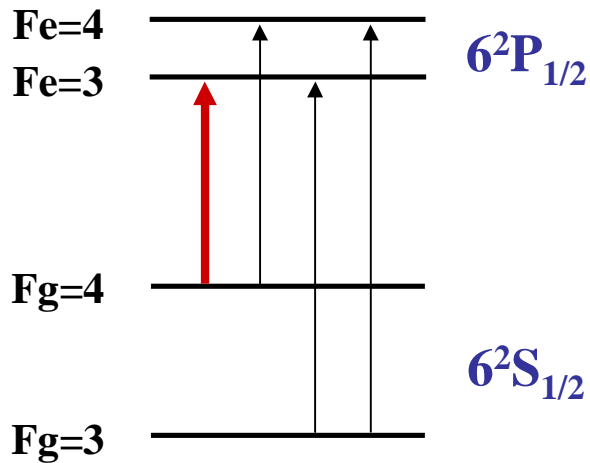
- 14 μ A in case of laser excitation
- 155 μ A in case of lamp excitation

For the $F_g=3 \leftrightarrow F_e=2$ transition amplitude of 40mV was reached when the photocurrent of PD was:

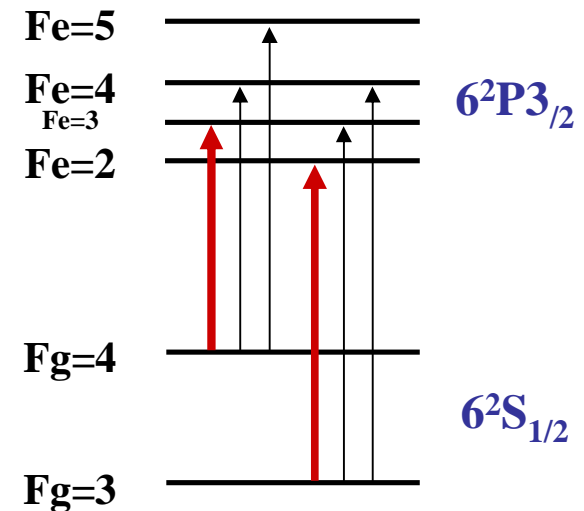
- 10 μ A in case of laser excitation
- 155 μ A in case of lamp excitation

| Transition $F_g \leftrightarrow F_e$ | Self-oscillation |
|--------------------------------------|------------------|
| 4 ↔ 3 | yes |
| 4 ↔ 4 | no |
| 4 ↔ 5 | no |
| 3 ↔ 2 | yes |
| 3 ↔ 3 | no |
| 3 ↔ 4 | no |

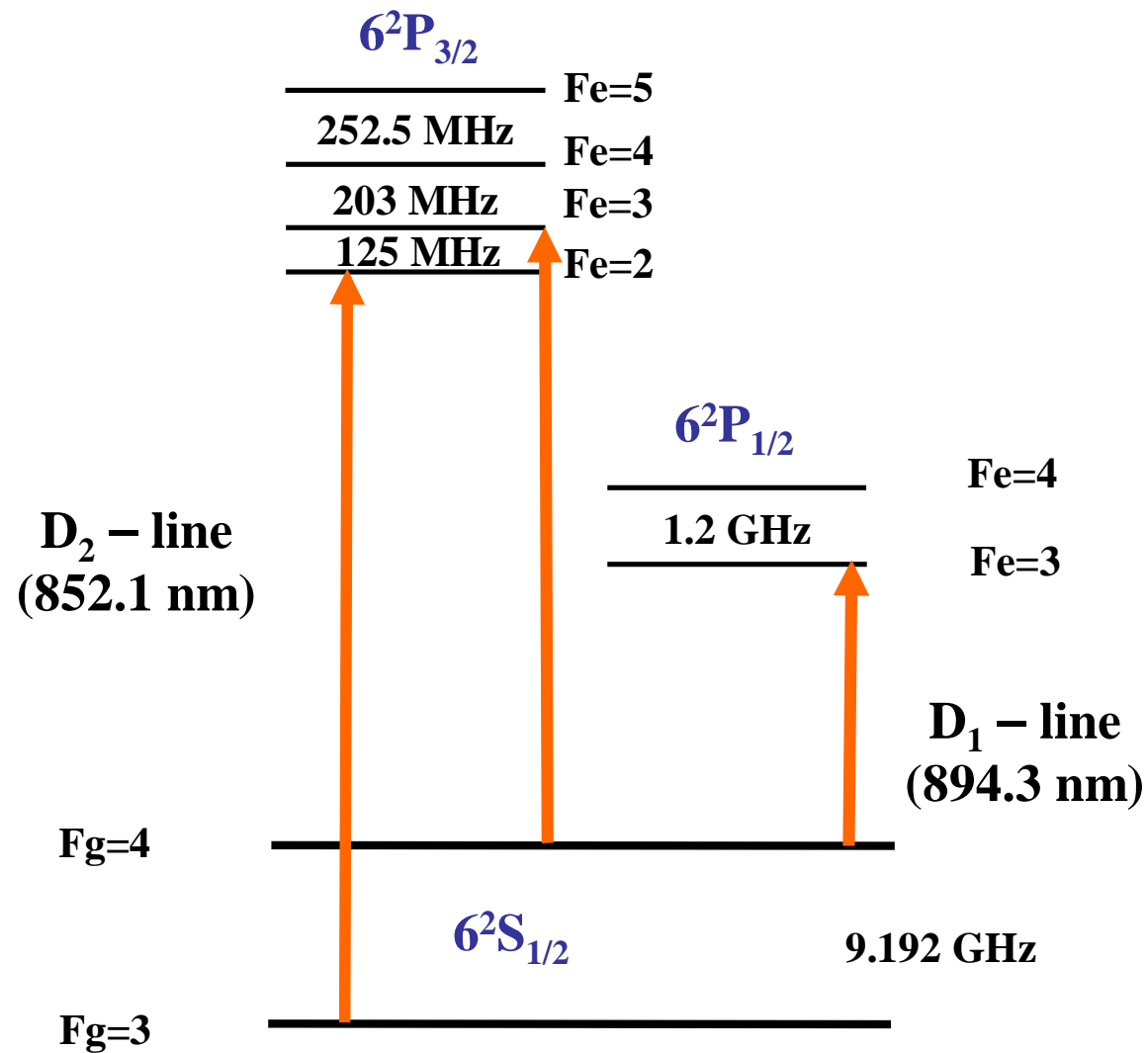
D₁-line excitation



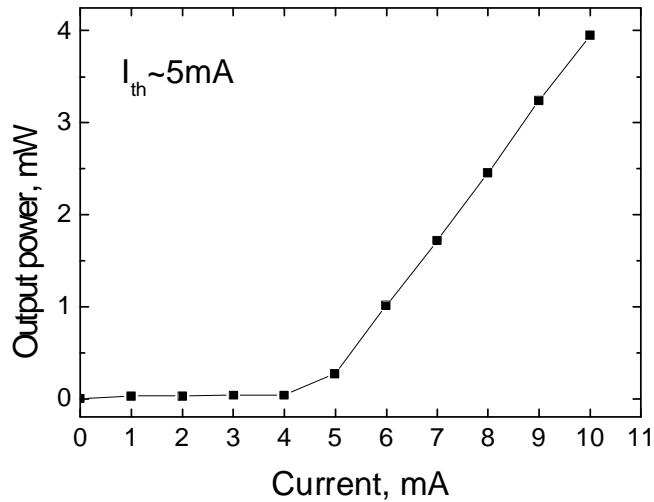
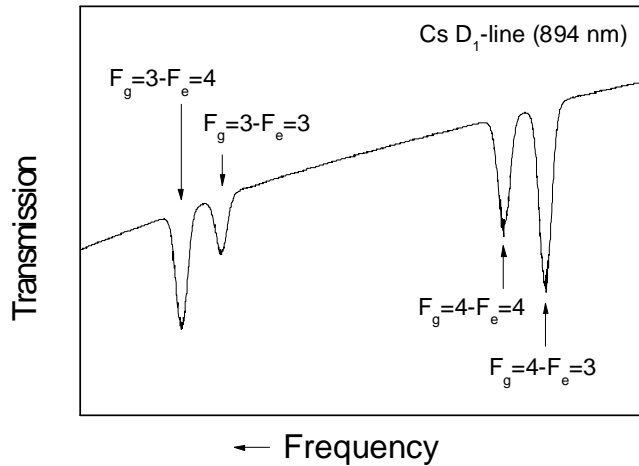
D₂-line excitation



Настройка лазера на эти переходы в ^{133}Cs обеспечивает возбуждение спинового генератора



Short cavity edge-emitting diode laser



LD characteristics:

$I_{th} = 4-5$ mA, Output power = 3 mW,
Resonator length = 100 μ m

Two different cells were tested with this laser:

- A cell containing Cs and 200 Torr of ^4He as buffer gas (from **MIP commercial magnetometer**) , **4-4 and 4-3 overlap**
- A Cs cell with paraffin wall coating

Both cells are cylinders with dimension $D=19\text{mm}$, $L=19\text{mm}$

Buffer gas cell

| Transition $F_g \leftrightarrow F_e$ | Self-oscillation |
|---|------------------|
| $4 \leftrightarrow 3$ | yes |
| $4 \leftrightarrow 4$ | yes |
| $3 \leftrightarrow 3$ | no |
| $3 \leftrightarrow 4$ | no |

Paraffin coated cell

| Transition $F_g \leftrightarrow F_e$ | Self-oscillation |
|---|------------------|
| $4 \leftrightarrow 3$ | yes |
| $4 \leftrightarrow 4$ | no |
| $3 \leftrightarrow 3$ | no |
| $3 \leftrightarrow 4$ | no |

These transitions overlap

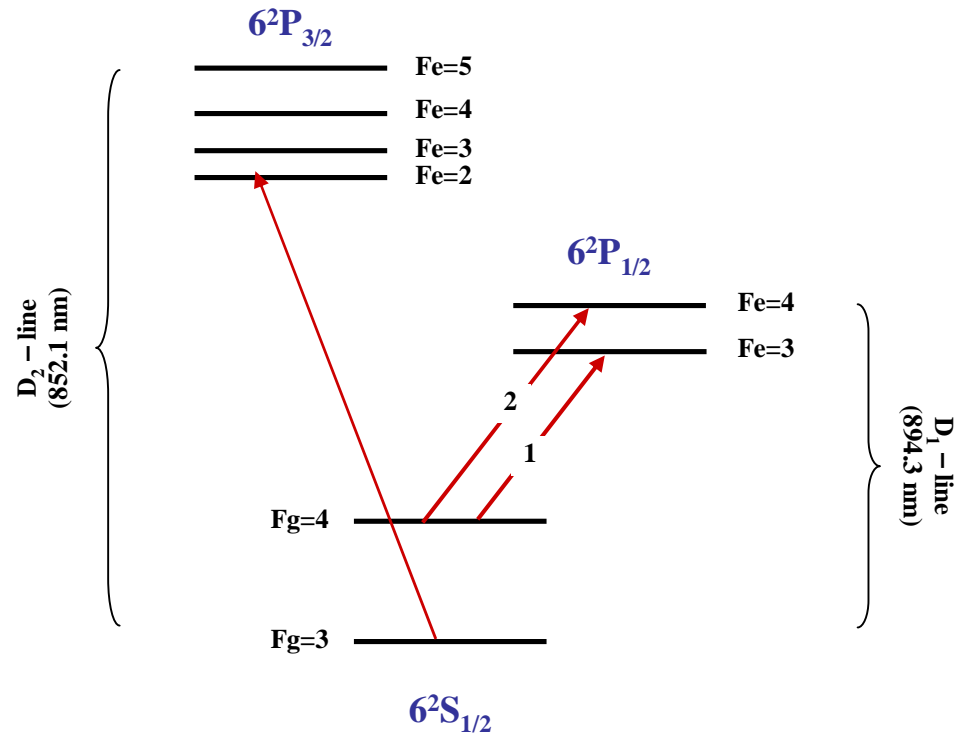
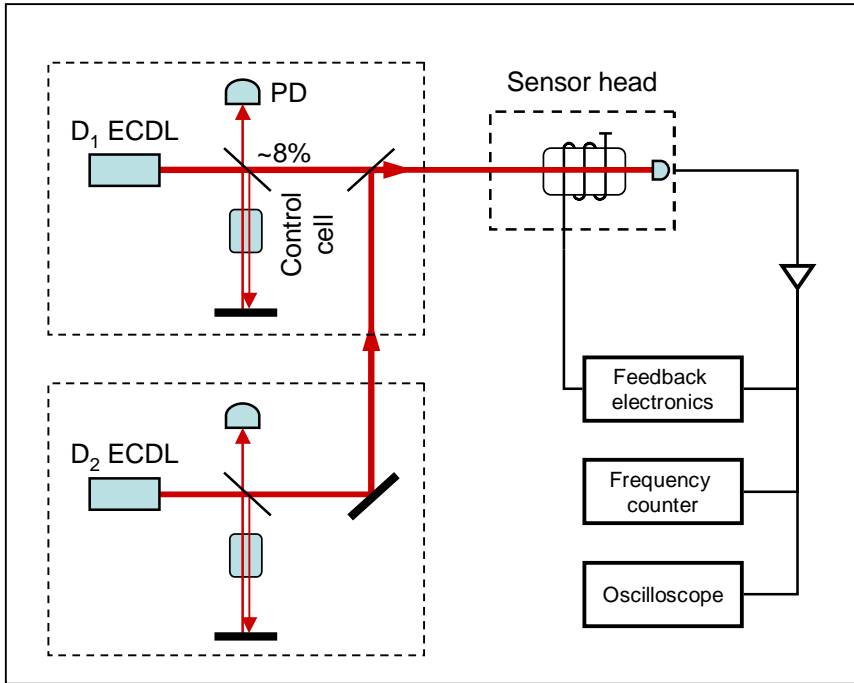
Same amplitude of the signal was obtained at the values of photocurrent of:

• **8 μ A (laser) and 27 μ A (lamp) for buffer gas cell** (This setup had a filter, to cut out the D_2 line component).

• **8 μ A (laser) and 82 μ A (lamp) for paraffin coated cell** (Lamp light contained both D_1 and D_2 components
 $I_{D1} = 1.3 I_{D2}$)

Excitation by two extended cavity diode lasers

Setup



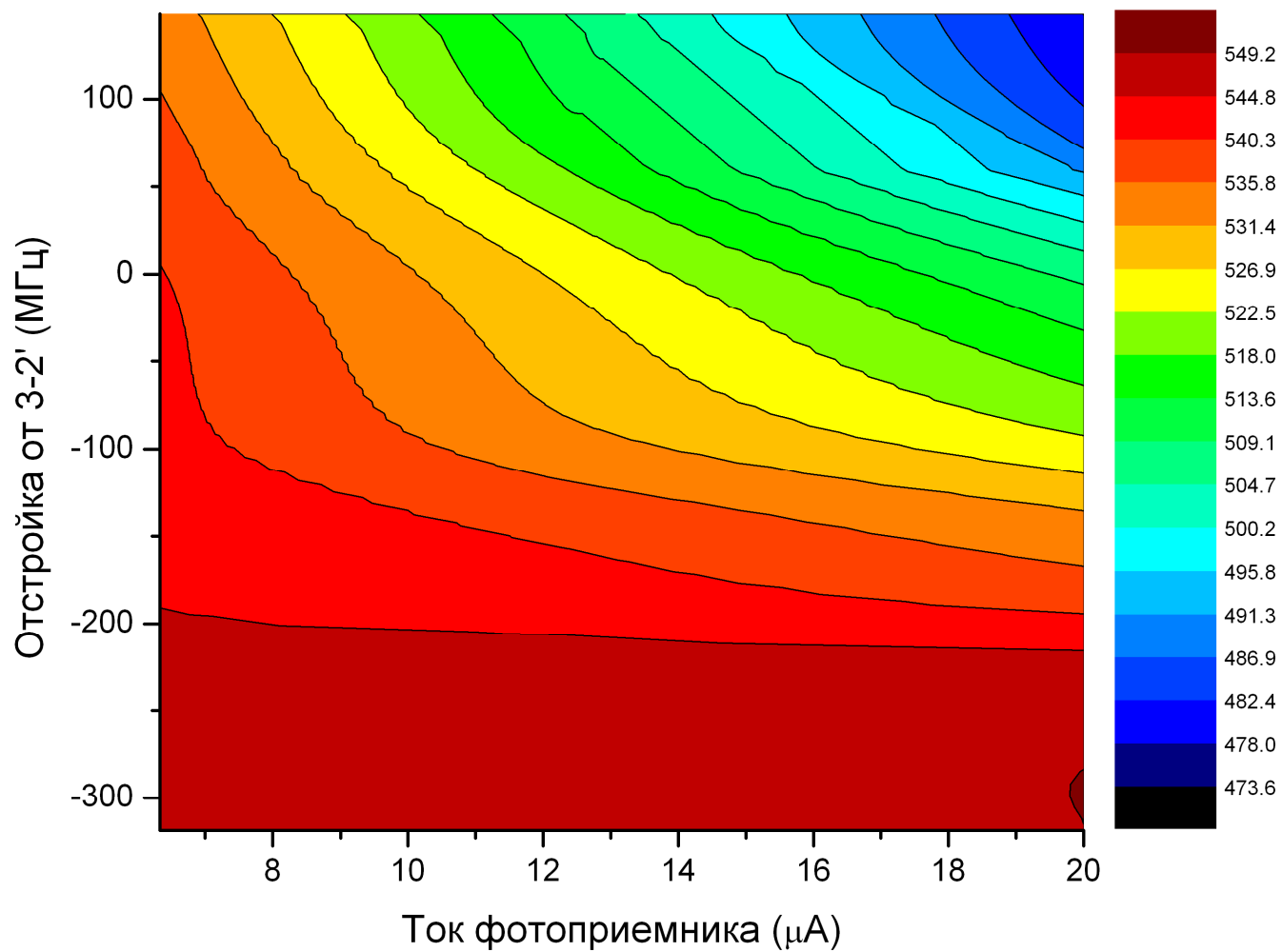
D₁-laser

| | Transition $F_g \leftrightarrow F_e$ | Self-oscillation | Signal level / Photocurrent |
|---|--------------------------------------|------------------|-----------------------------|
| 1 | 4 ↔ 3 without D ₂ -laser | yes | 78 mV / 113 μA |
| | 4 ↔ 3 with D ₂ -laser | yes | 230 mV / 98 μA |
| 2 | 4 ↔ 4 without D ₂ -laser | no | — |
| | 4 ↔ 4 with D ₂ -laser | yes | 70 mV / 103 μA |

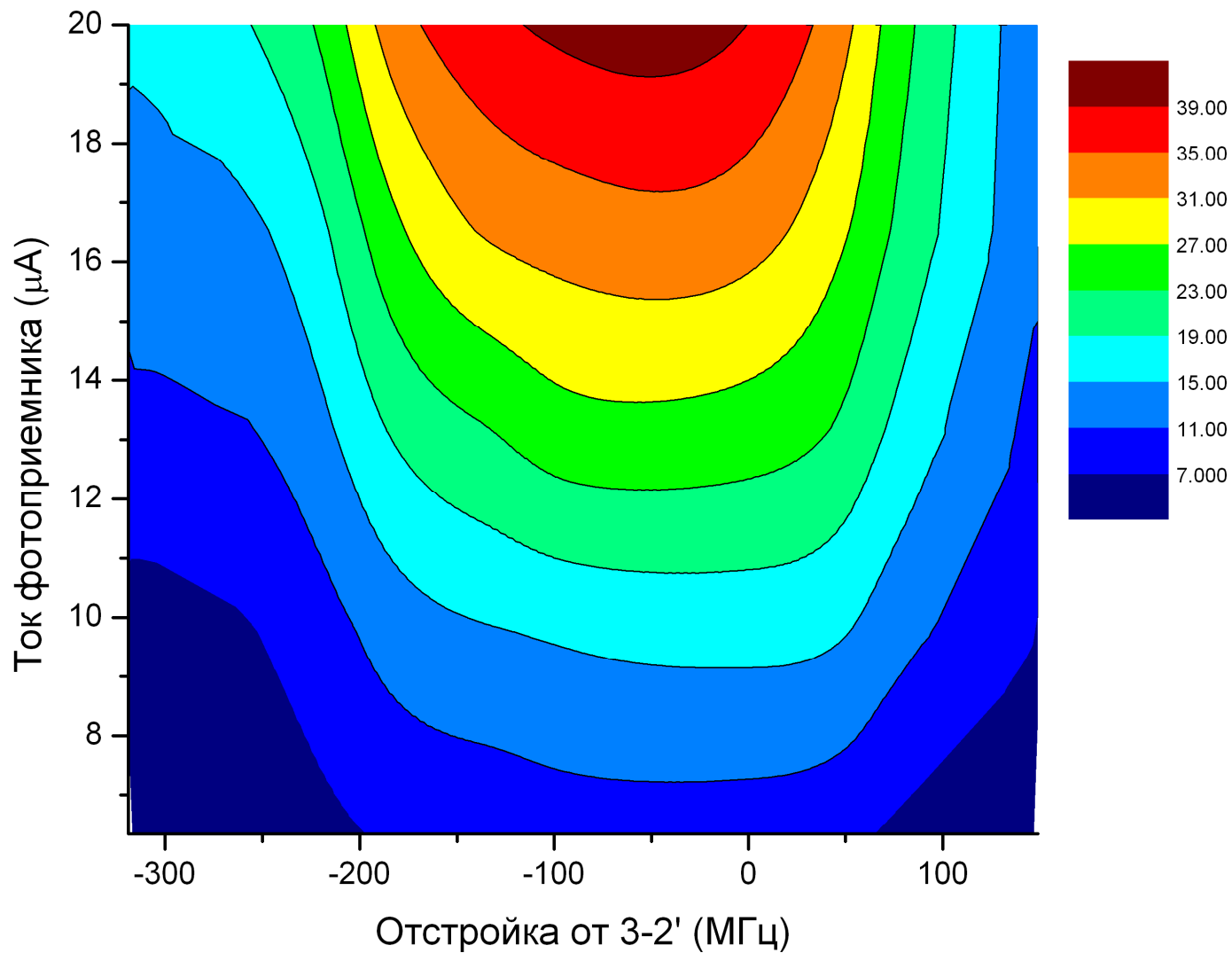
D₂-laser frequency was resonant with $F_g=3 \leftrightarrow F_e=2$ transition. Oscillation signal level was 53mV and the photocurrent was 12μA

Self-oscillation frequency corresponded to the F=4 ground state gyromagnetic ratio.

Other possible configurations are to be checked

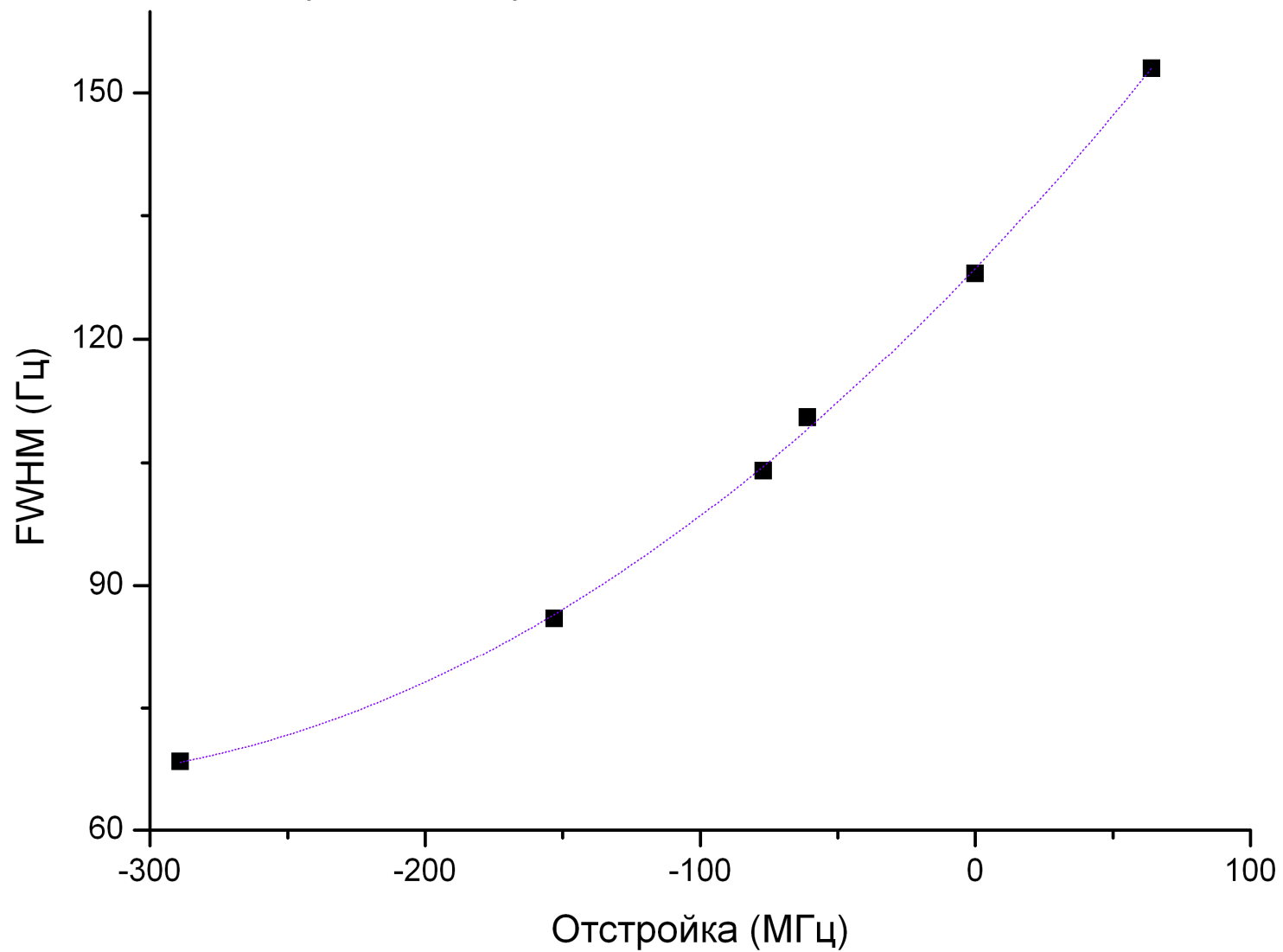


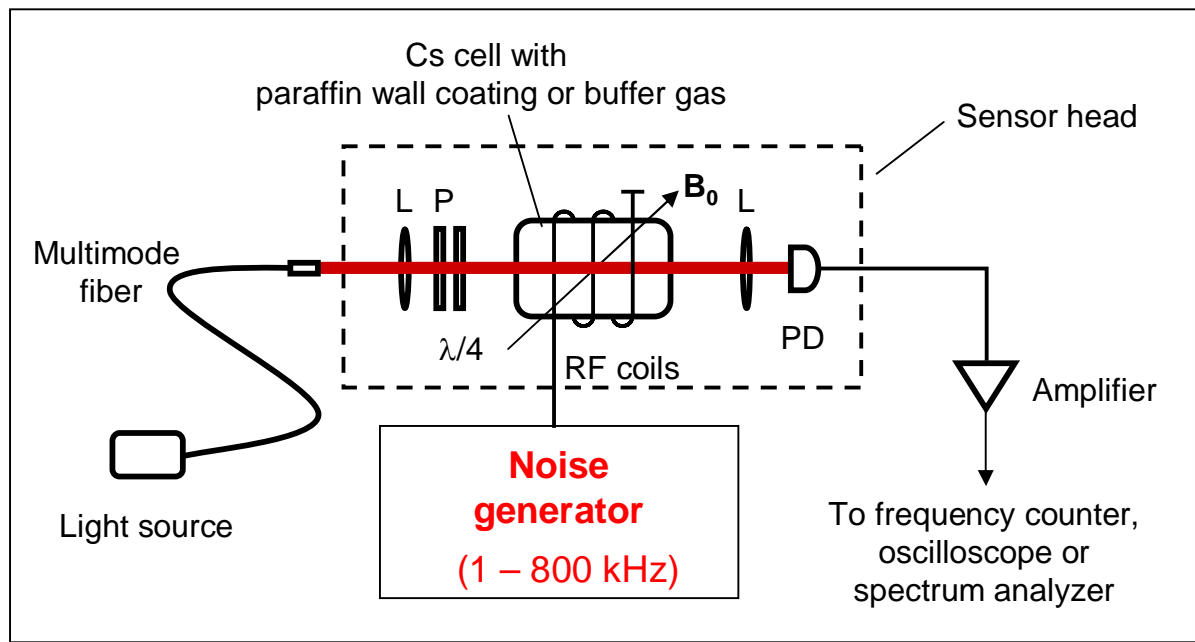
Смещение частоты генерации магнитометра, в зависимости от уровня накачки и отстройки от перехода 3-2'.



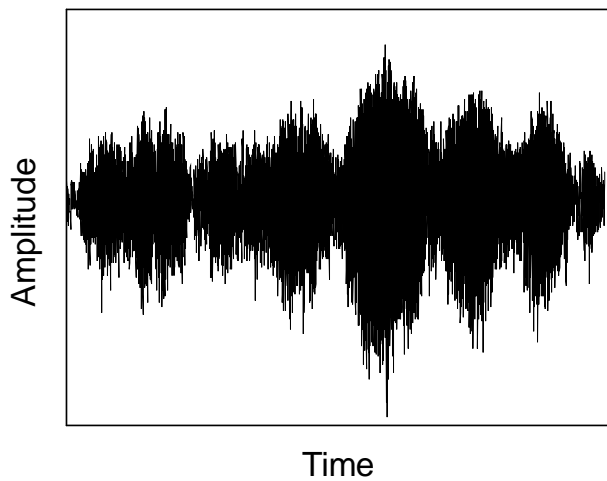
**Зависимость амплитуды сигнала
спинового генератора от светового потока
и отстройки от перехода 3-2'.**

Зависимость ширины линии магнитного резонанса от отстройки от перехода 3-2'

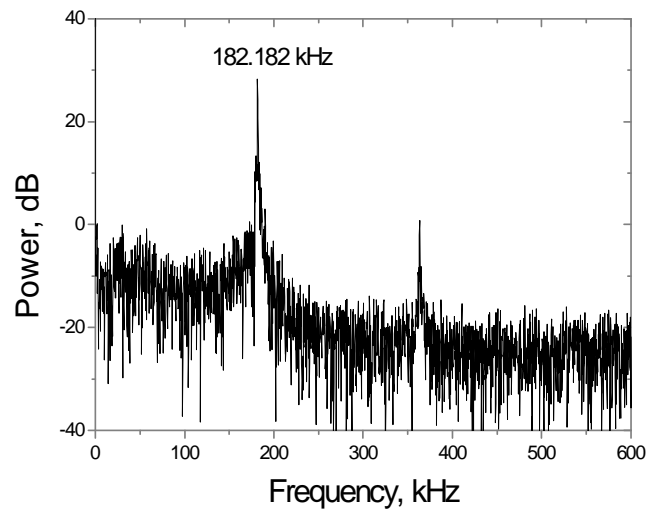


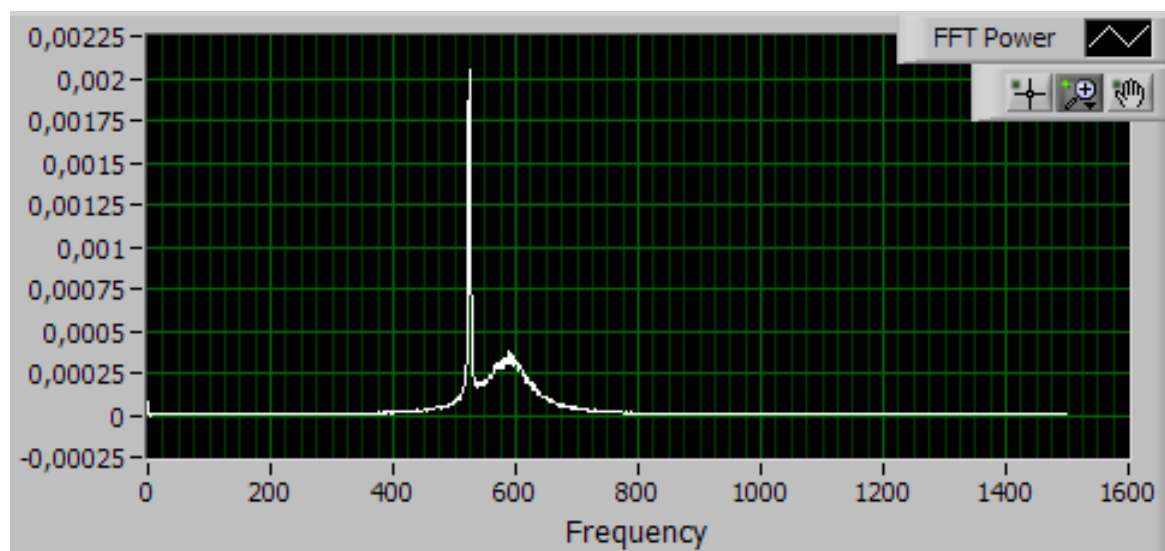
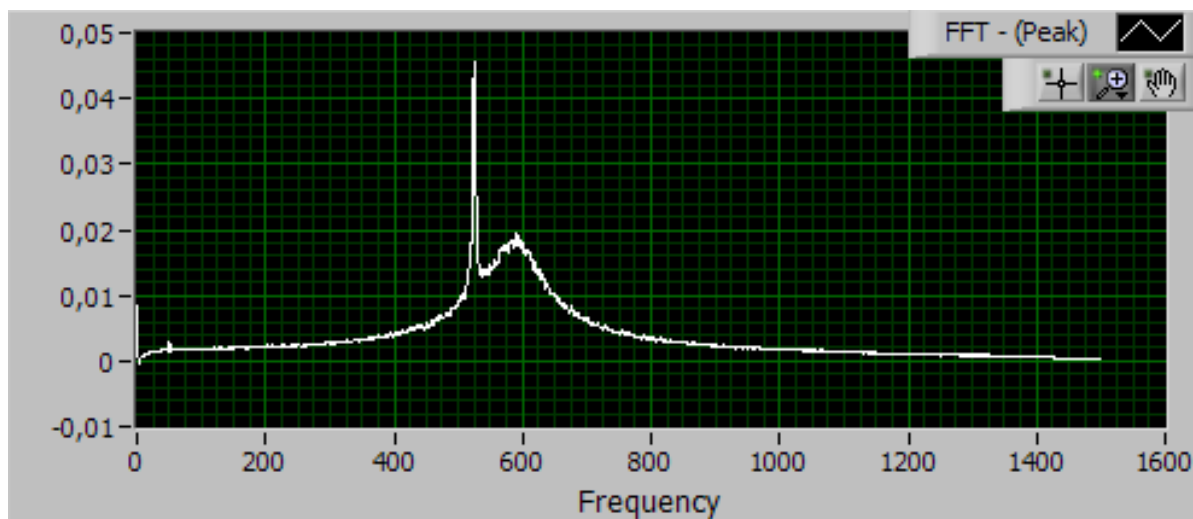


Time domain



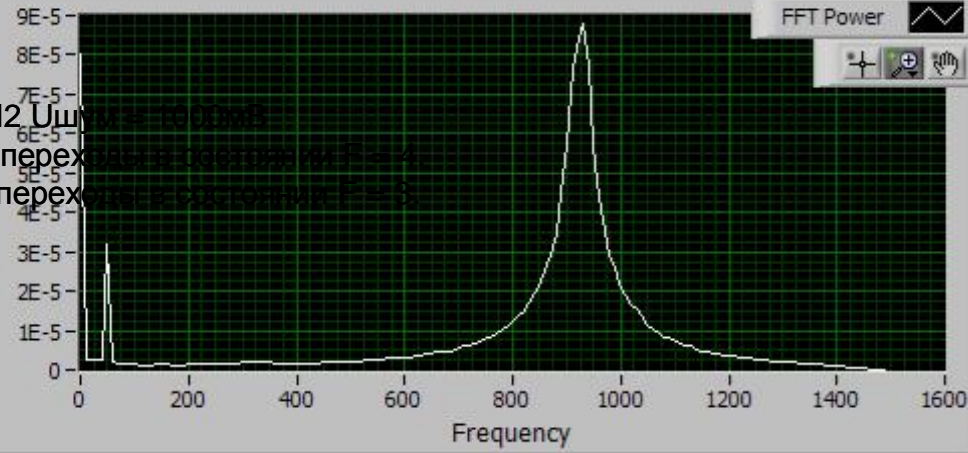
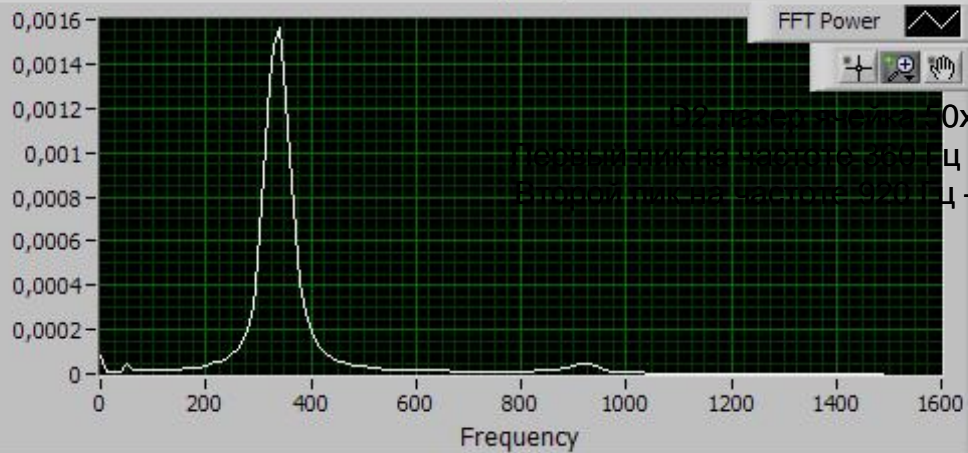
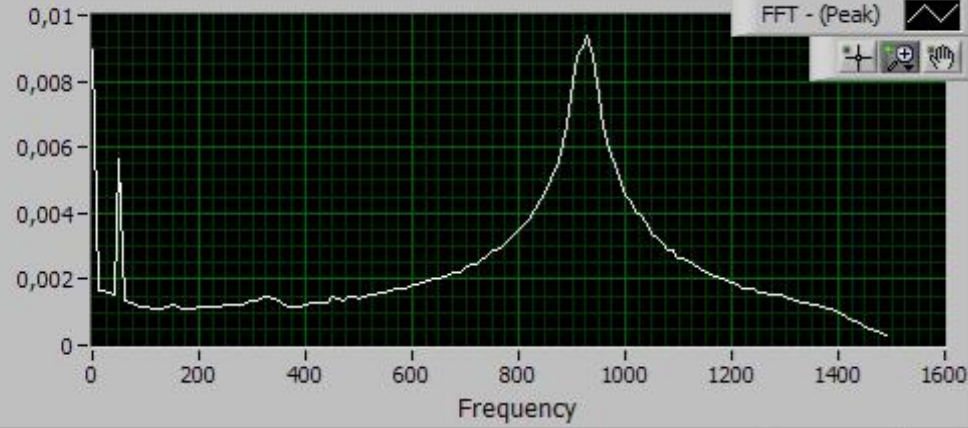
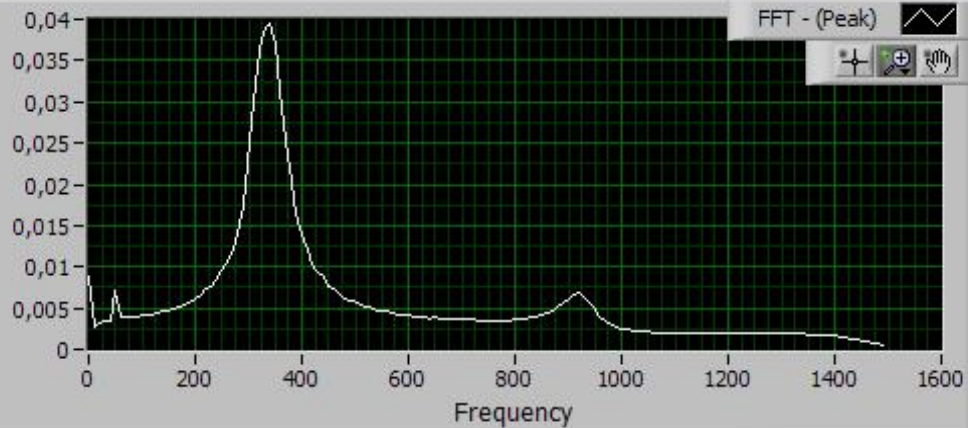
FFT





Для измерения использовались два Cs датчика автоколебательного типа:

– гетеродин - имел смещение по магнитному полю. Разность частот датчиков в автокол. режиме 525 Гц. Далее, во втором датчике разрывалась цепь обратной связи и в рч катушку подводилось напряжение от шумового генератора. Спектр линии магнитного резонанса накапливался (разрешение по частоте – 1Гц, центр линии соответствовал частоте 592 Гц) и перед завершением накопления (1-3 реализации) датчик переводился в режим генерации. В результате в спектре линии появляется линия, соответствующая частоте генерации, на фоне спектра линии магнитного резонанса.

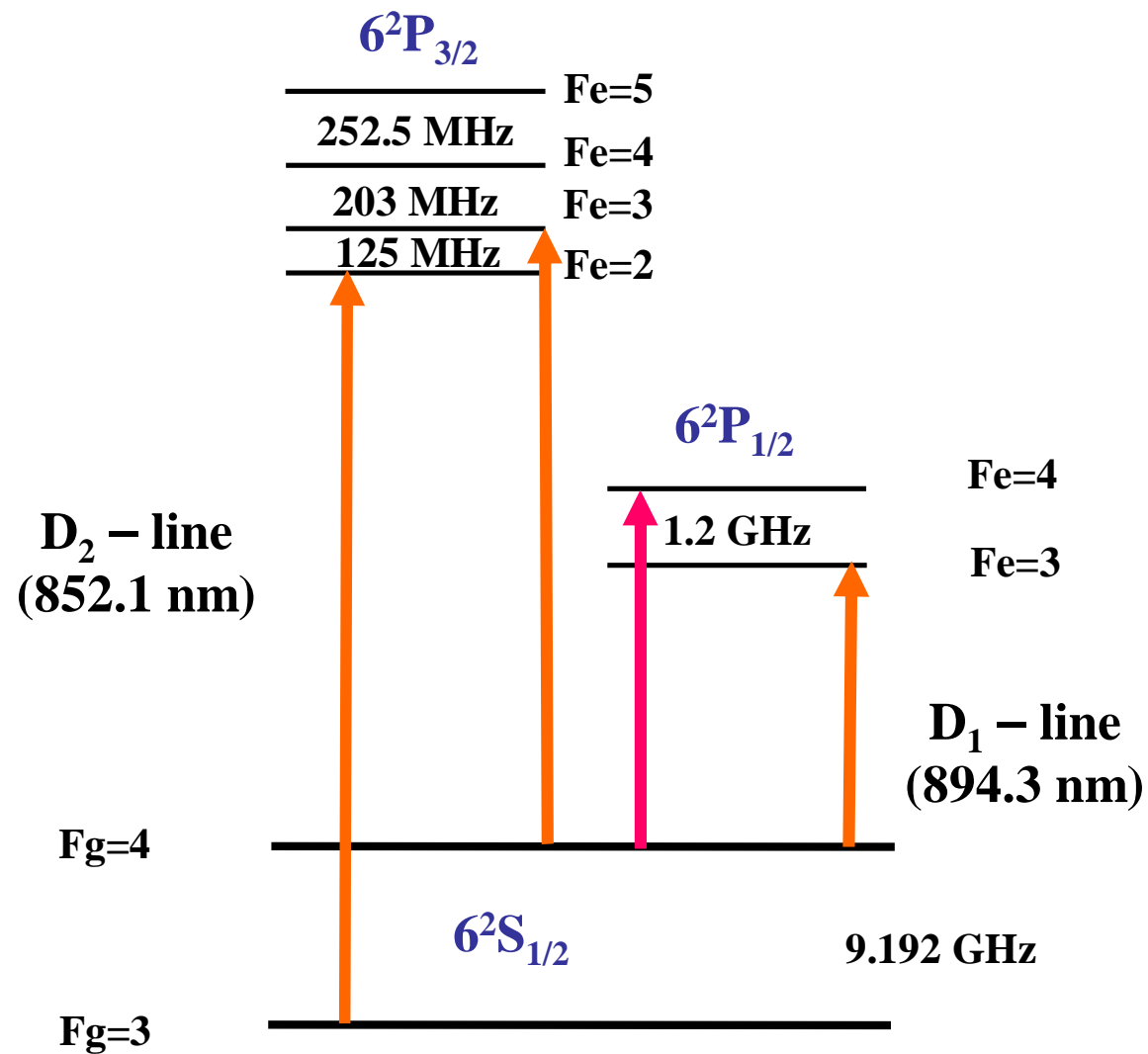


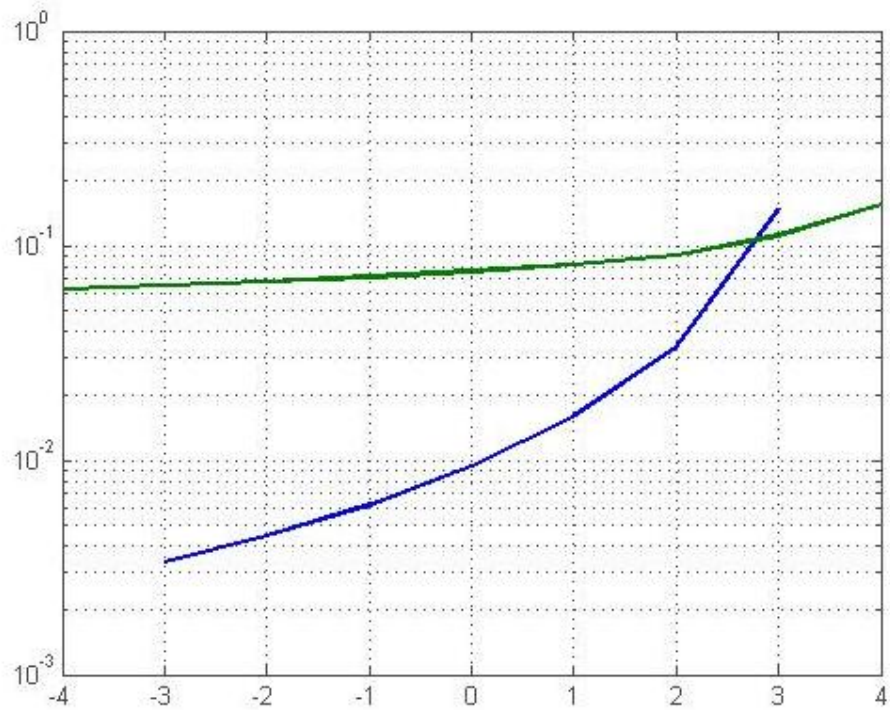
50 Торр

25 торр

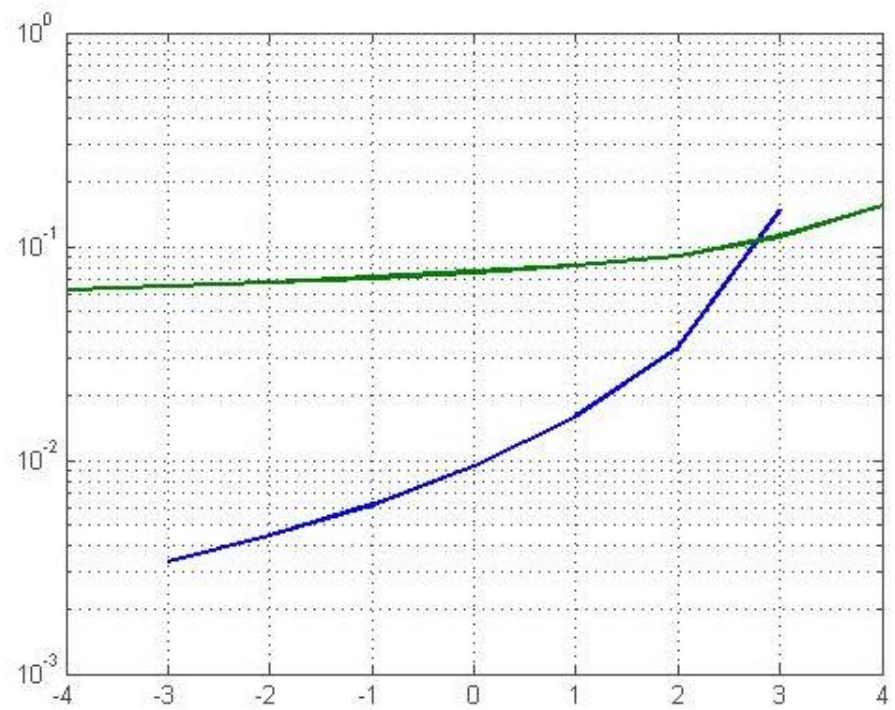
D2 лазер ячейка 50x50 N2 Ушум = 1000мВ
 Первый пик на частоте 360 Гц – рч переходы в состоянии F = 4.
 Второй пик на частоте 920 Гц – рч переходы в состоянии F = 3.

Настройка лазер OV на эти переходы в ^{133}Cs обеспечивает возбуждение спинового генератора





Лазер настроен на частоту перехода 3 - 2



Лазер настроен на частоту перехода 3 – 2 (-100 МГц)

Проблемы

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ

- Рабочая точка. Частота модуляции > 1 МГц?
- Вторая ячейка?

• ЛАЗЕР

- Выбор рабочего перехода. D1 или D2 ?
- Выбор лазера. Лучше всего VCSEL – но требования к стабильности температуры выше. Затем – лазер с решеткой в волокне.
- Едва ли удастся сделать VCSEL на 895 нм. Только на 852 нм.

• АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Спиновые генераторы работают с однолазерной накачкой (тем более с двухлазерной), потребляя по сравнению с ламповыми на порядок меньшую световую мощность и на два порядка – электрическую.
- Среди 10 СТ- переходов для D_2 оптимален $F_g = 3 \rightarrow F_e = 2$ (насколько нам известно, генерация при накачке на этом переходе получена впервые) ; для D_1 - $F_g = 3 \rightarrow F_e = 2$.
- Излучением диодного лазера с коротким резонатором осуществлена оптическая накачка коммерческого магнитометра ПКМ-1 (He 200Торр, 20X20)
- Предложен новый метод настройки цепи обратной связи магнитометра с использованием генератора шума
- Проведено систематическое исследование характеристик (зависимости световых сдвигов и сигнала спинового генератора от частоты лазера, размеров ячеек с покрытием, давления и типа буферного газа) на переходе $F_g = 3 \rightarrow F_e = 2$ (D_2 линия)
- В ячейках с покрытием обнаружены особенности спектрально – переходных характеристик спинового генератора на интервале порядка однородной ширины линии (внутридоплеровские эффекты).
- Подбираемся к теоретической модели.