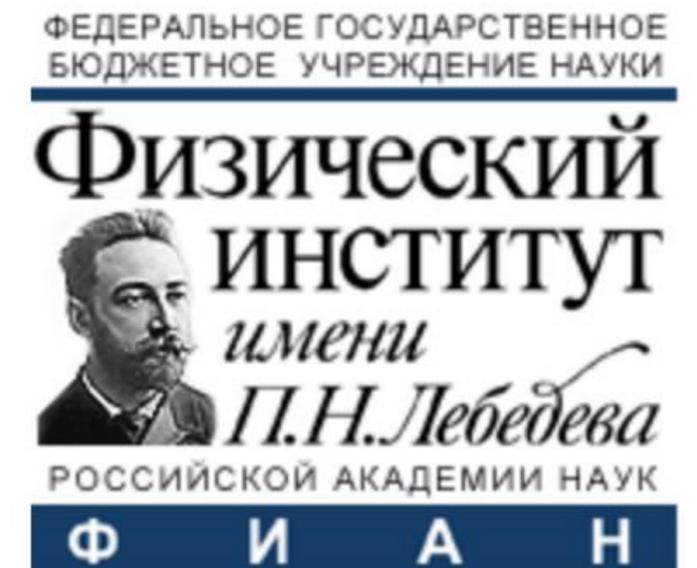


Оптический метод измерения спиновой динамики на основе электронного парамагнитного резонанса в условиях резонансного спинового усиления

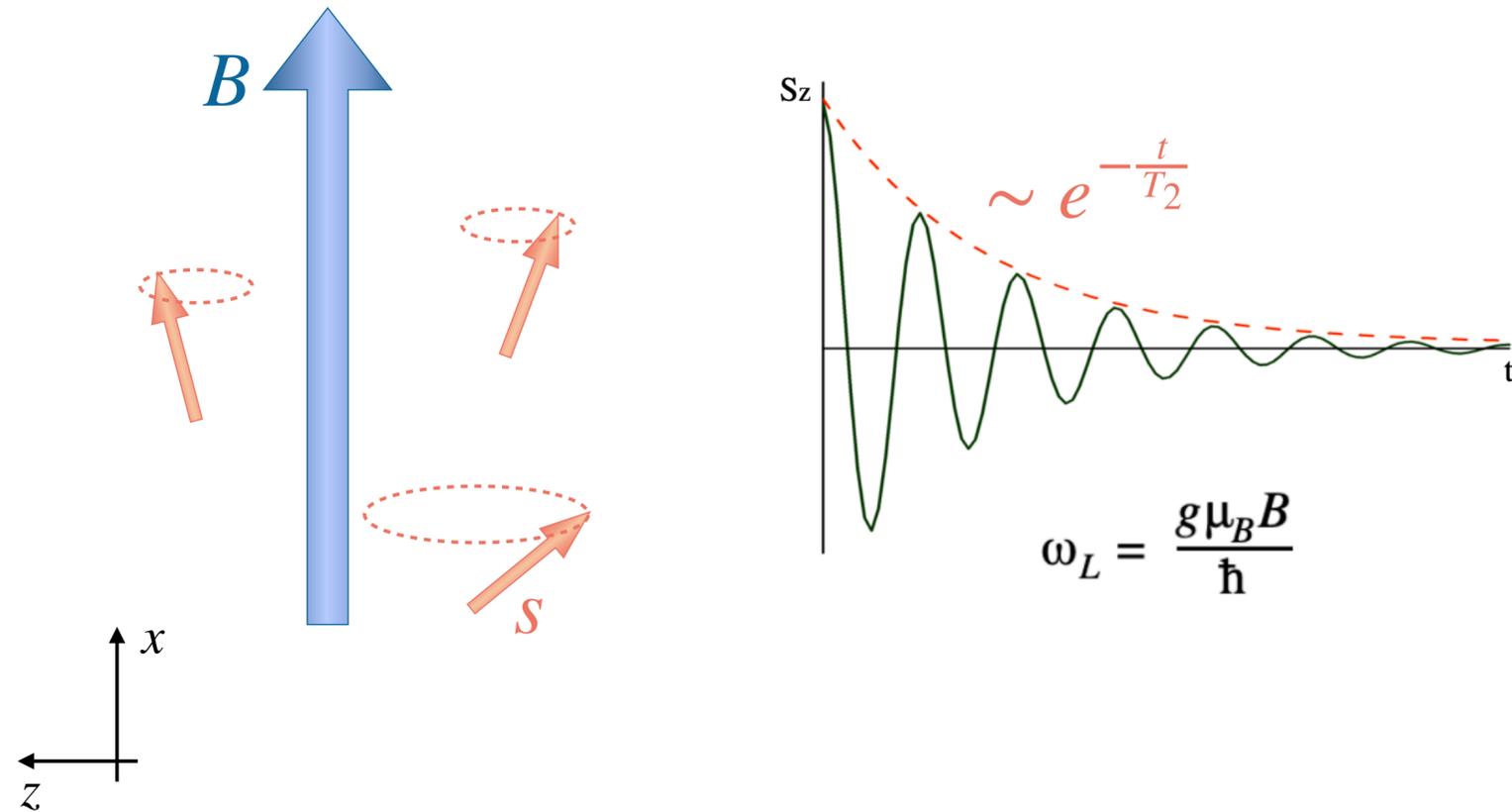
Александра Коротнева
руководитель В. В. Белых

НИУ ВШЭ, кафедра физики низких температур, ФИАН

Москва, 2021



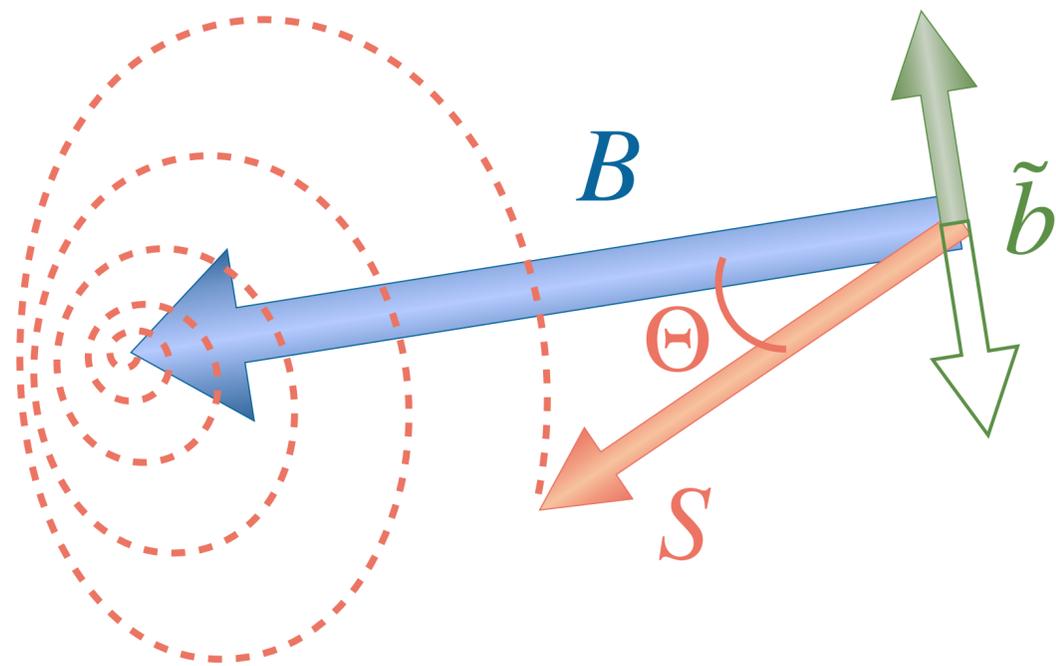
Спин в магнитном поле



- * Спин вращается в магнитном поле с ларморовской частотой ω_L .
- * Затухание перпендикулярной полю компоненты спина характеризуется временем поперечной релаксации.
- * Из-за небольшой разницы в частотах вращения спинов в ансамбле суммарный спин может затухать быстрее.

T_2 — поперечное время релаксации
 T_2^* — поперечное время релаксации для ансамбля

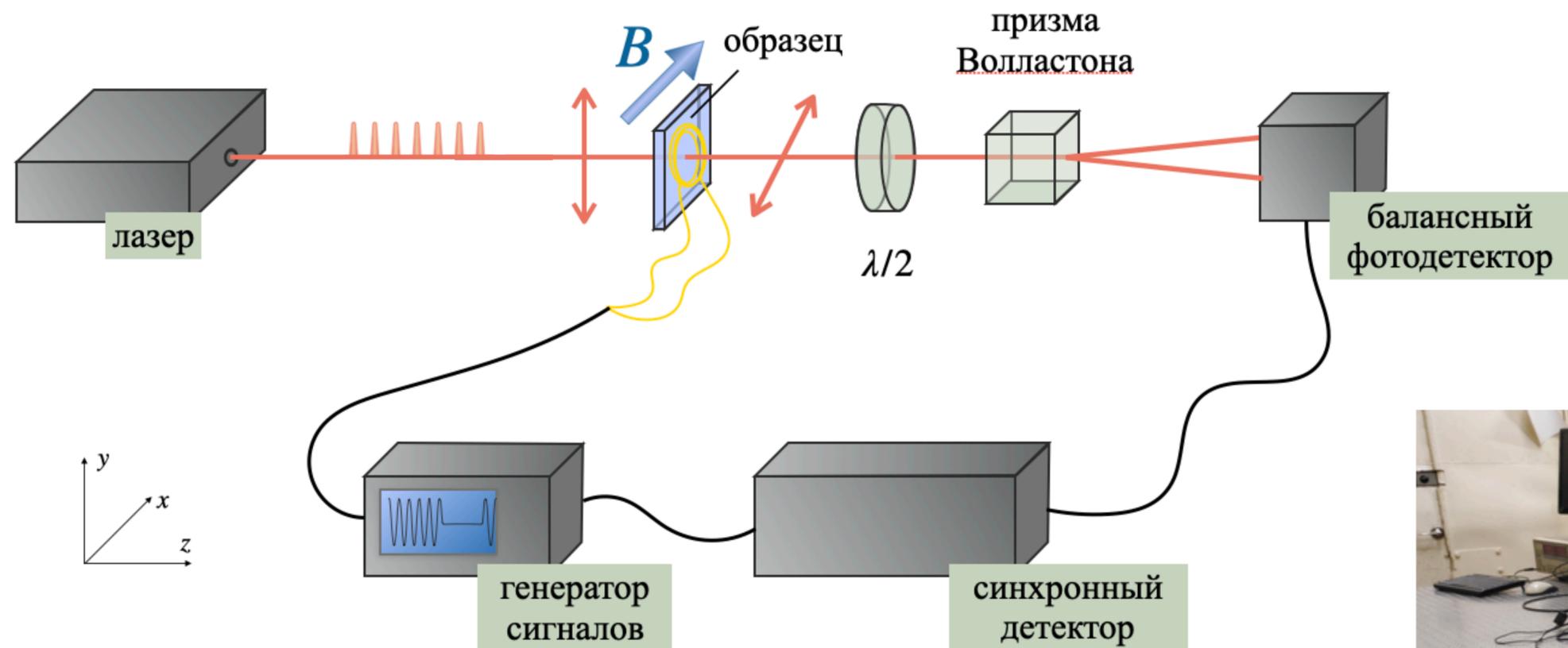
Электронный парамагнитный резонанс



$$\text{ЭПР: } f_{RF} = f_L$$

- * Увеличения наблюдаемого сигнала можно добиться сориентировав и синхронизировав спины.
- * В условиях ЭПР дополнительный вращательный момент заставляет спин стремиться к экваториальной плоскости.
- * Микроскопические спины синхронизируются, что приводит к увеличению модуля макроскопического спина.
- * Методы основанные на ЭПР дают информацию о времени релаксации и частоте вращения спинов.

Схема эксперимента



Образец - n GaAs

$$T_2 \simeq T_2^* \simeq 300 \text{ нс}$$

$$n = 1.4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2}$$

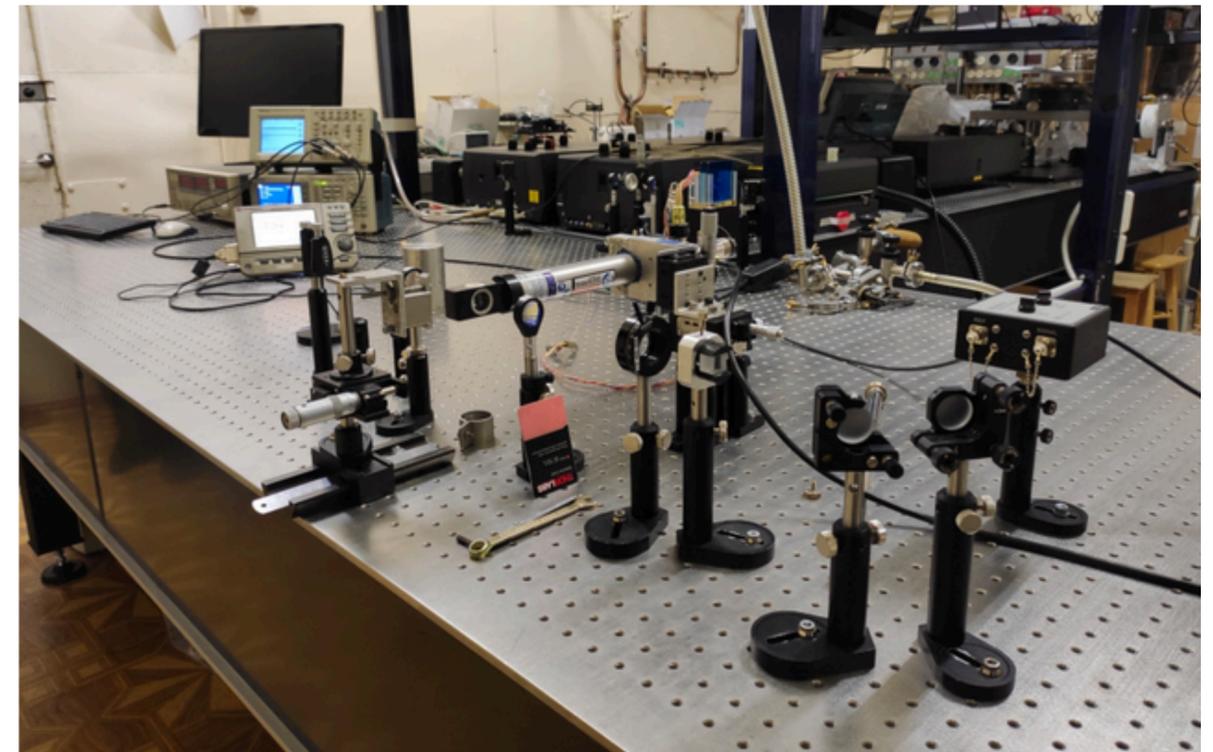
$$\Delta = 1.512 \text{ эВ } (\lambda = 815 \text{ нм})$$

$$\lambda = 826 \text{ нм}$$

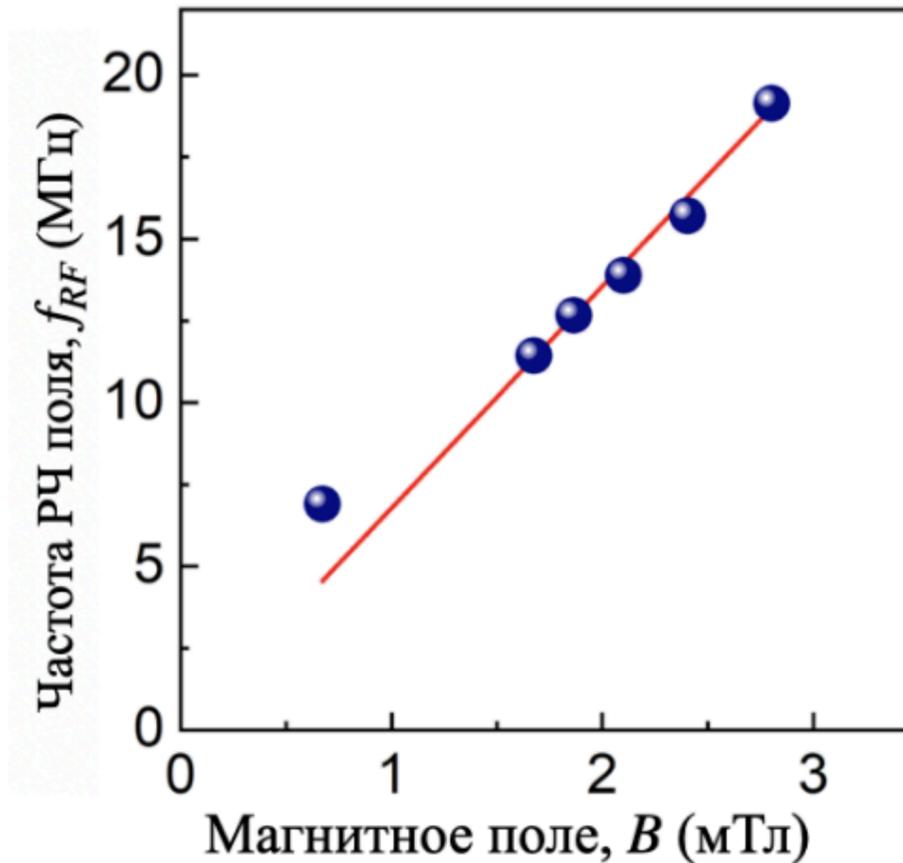
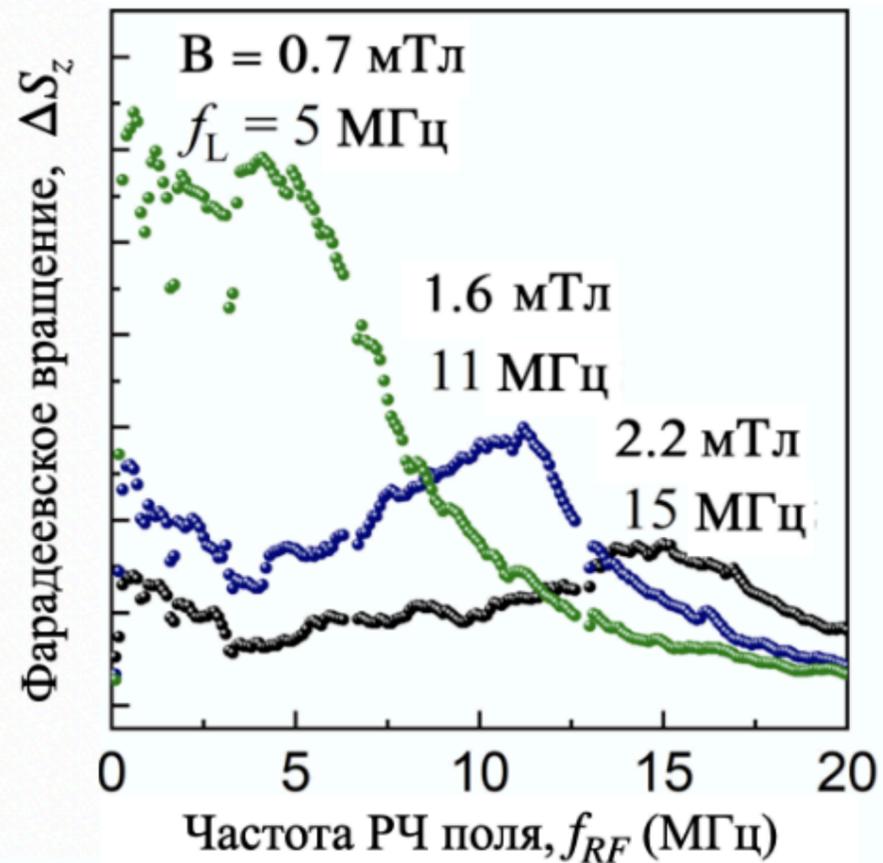
$$f_0 = 76 \text{ MHz}$$

$$\Delta t = 2 \text{ пс}$$

$$T = 6 \text{ K}$$



Наблюдение ЭПР

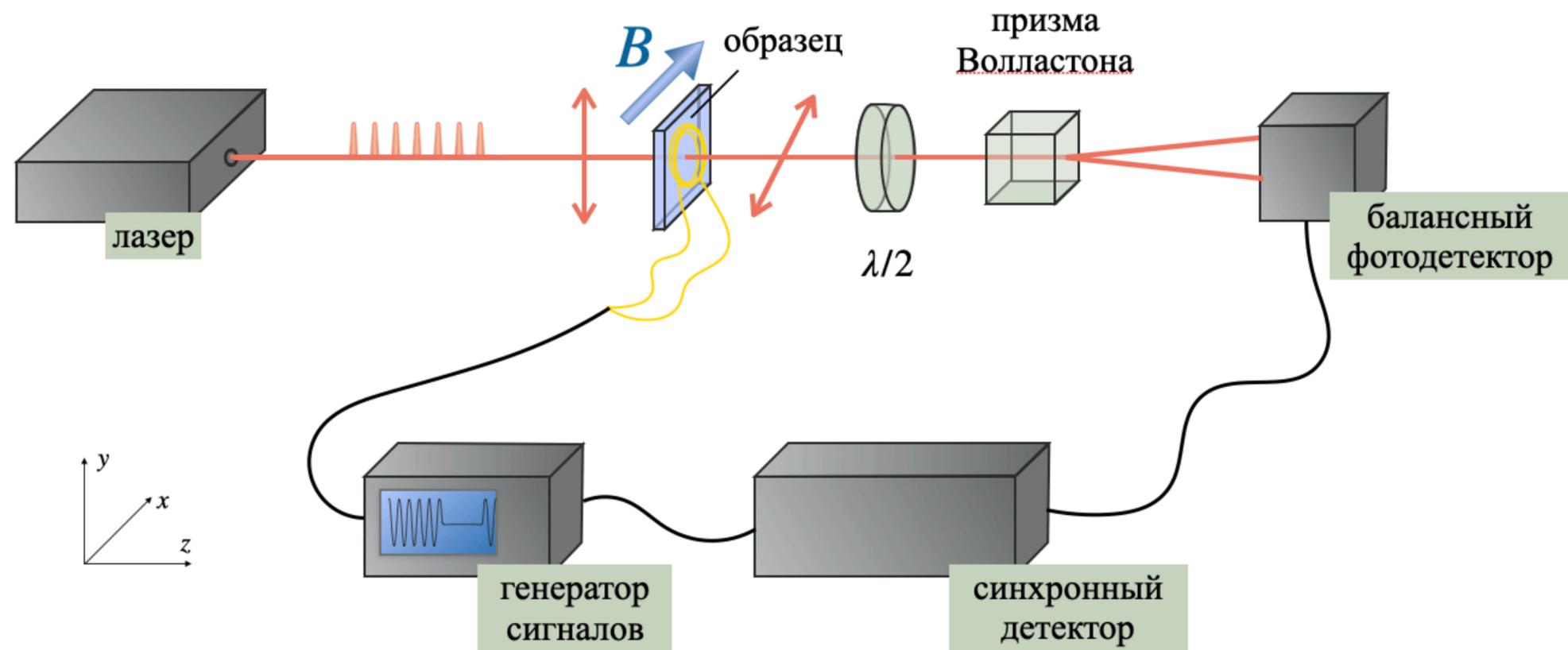


- частота резонанса растет линейно с магнитным полем
- не выявлено зависимости ширины пика от поля



- высота пика уменьшается с увеличением поля

Обновленная схема эксперимента



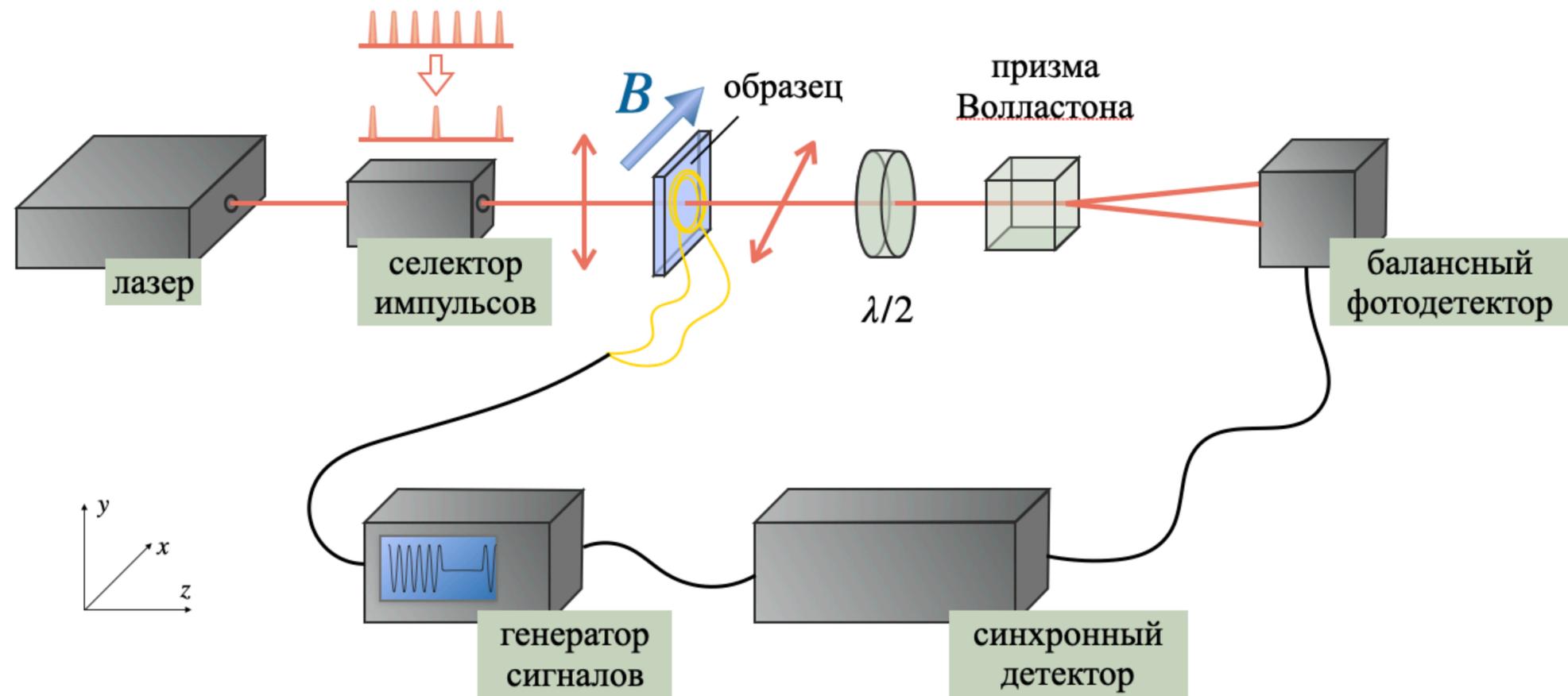
$$\lambda = 826 \text{ нм}$$

$$f_0 = 76 \text{ МГц}$$

$$\Delta t = 2 \text{ пс}$$

$$T = 6 \text{ К}$$

Обновленная схема эксперимента



$$\lambda = 826 \text{ нм}$$

~~$$f_0 = 76 \text{ МГц}$$~~

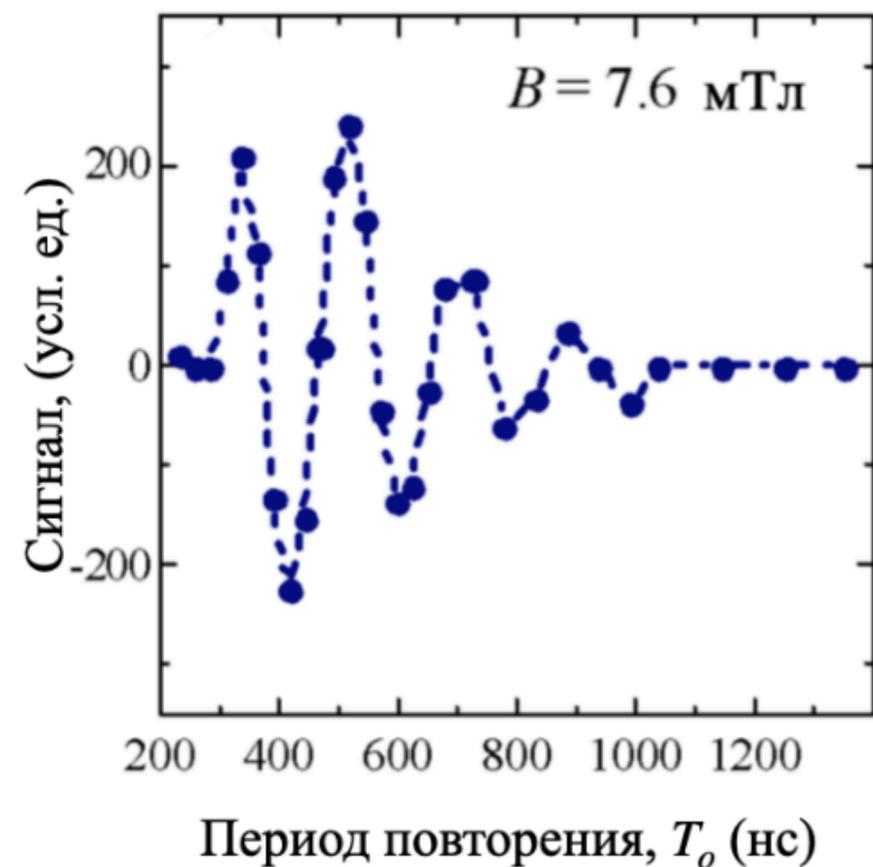
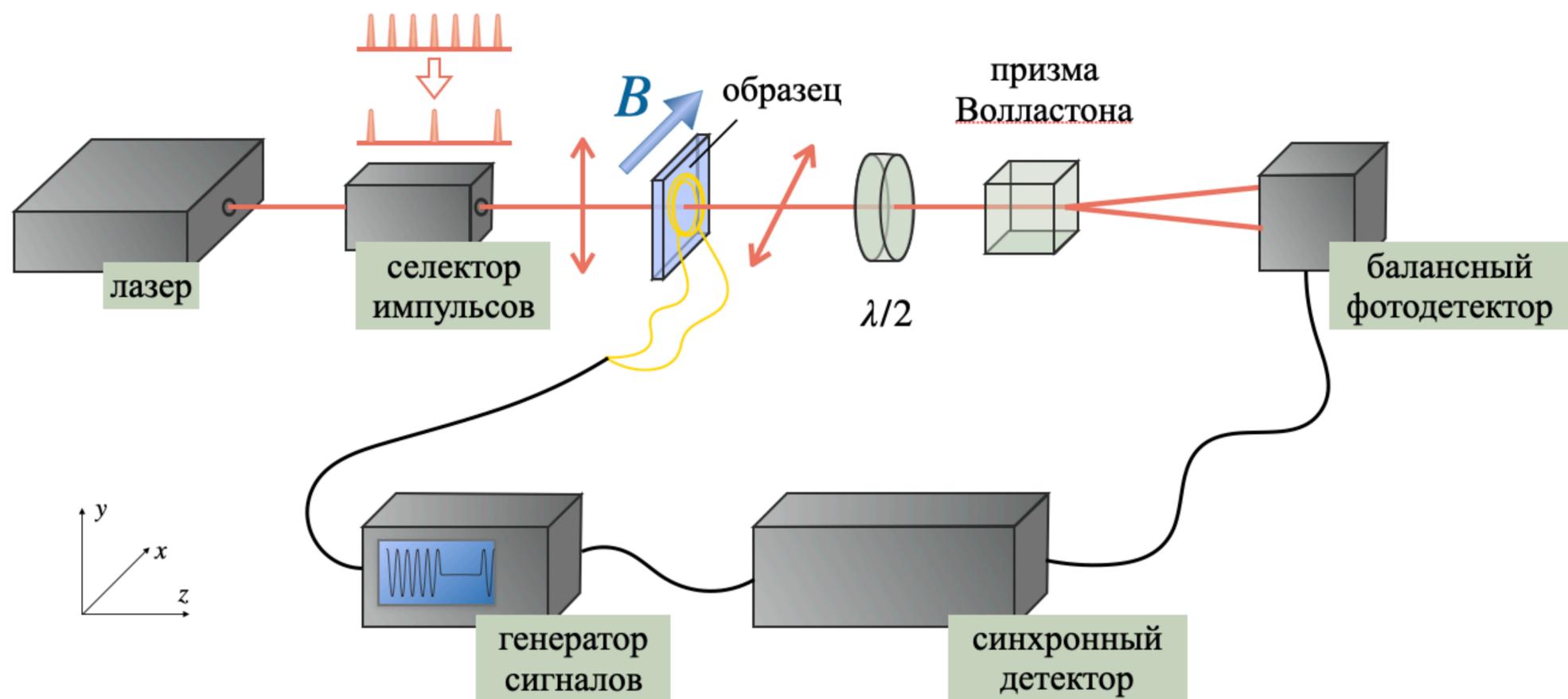
$$\Delta t = 2 \text{ пс}$$

$$T = 6 \text{ К}$$

$$\Downarrow \div 16$$

$$f_0 = 4.8 \text{ МГц}$$

Обновленная схема эксперимента



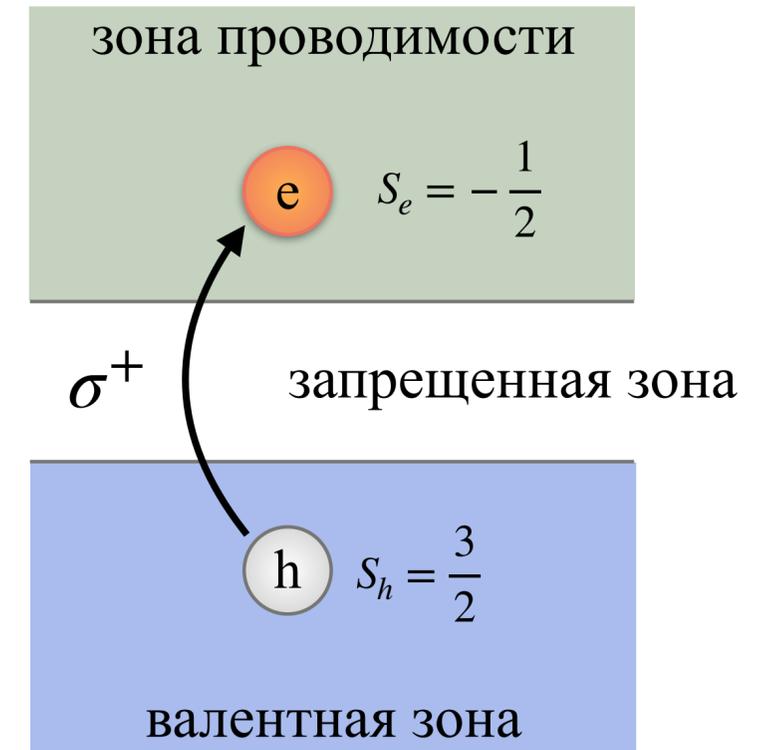
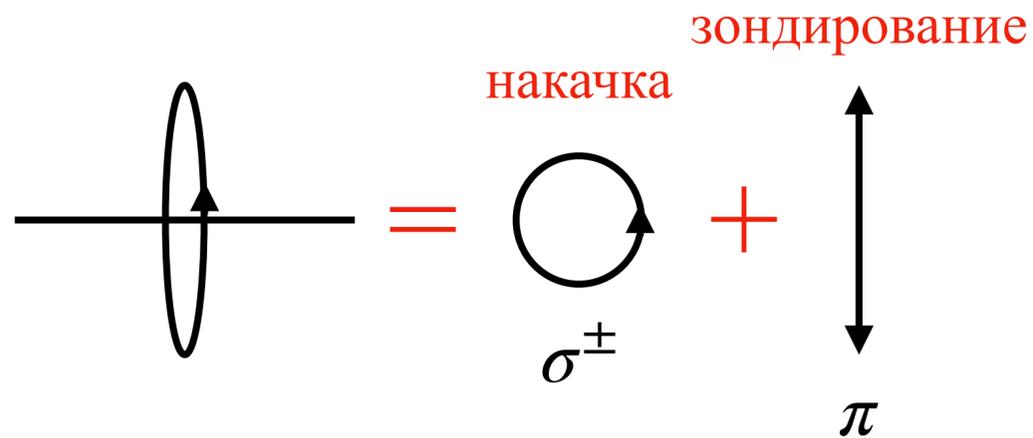
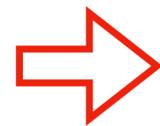
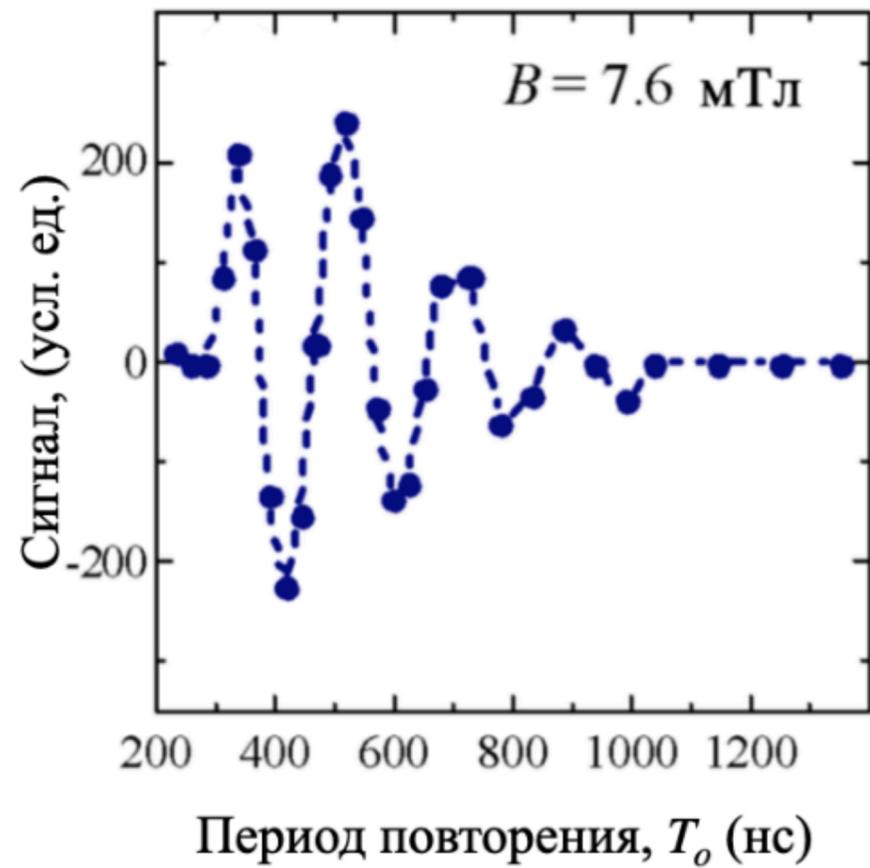
$$\lambda = 826 \text{ нм}$$

$$f_o \leq 4.8 \text{ МГц}$$

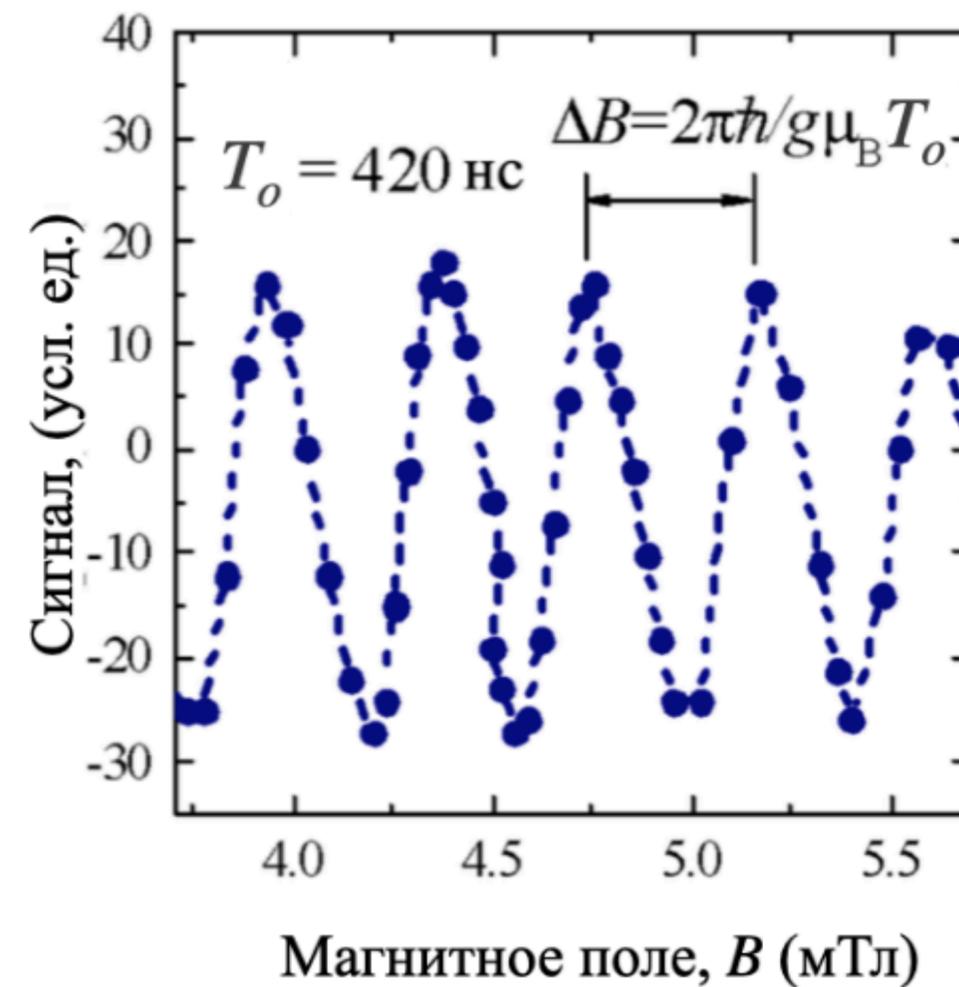
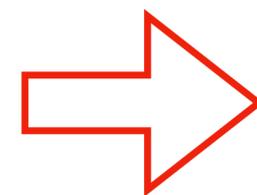
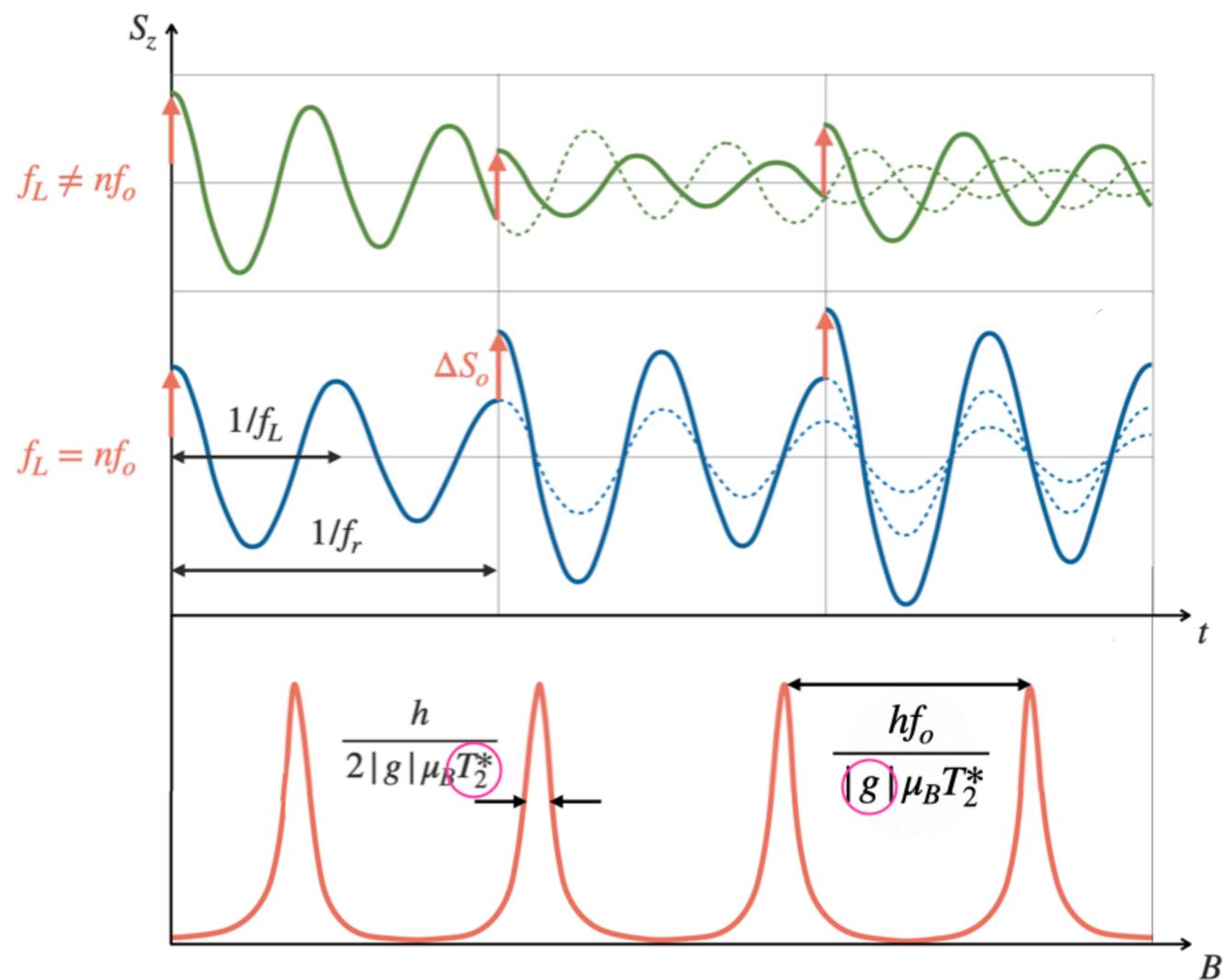
$$\Delta t = 2 \text{ пс}$$

$$T = 6 \text{ К}$$

Обнаружение резонансного спинового усиления



Резонансное спиновое усиление



$$S_z(\Delta t, B) = \sum_n \Theta(\Delta t + nT_0) \cdot A e^{-(\Delta t + nT_0)/T_2^*} \cdot \cos[2\pi f_L(\Delta t + nT_0)]$$

$$\frac{\delta S_z}{\delta B} \sim \frac{\delta S_z}{\delta \omega} \Rightarrow T_r, |g|$$

Идея

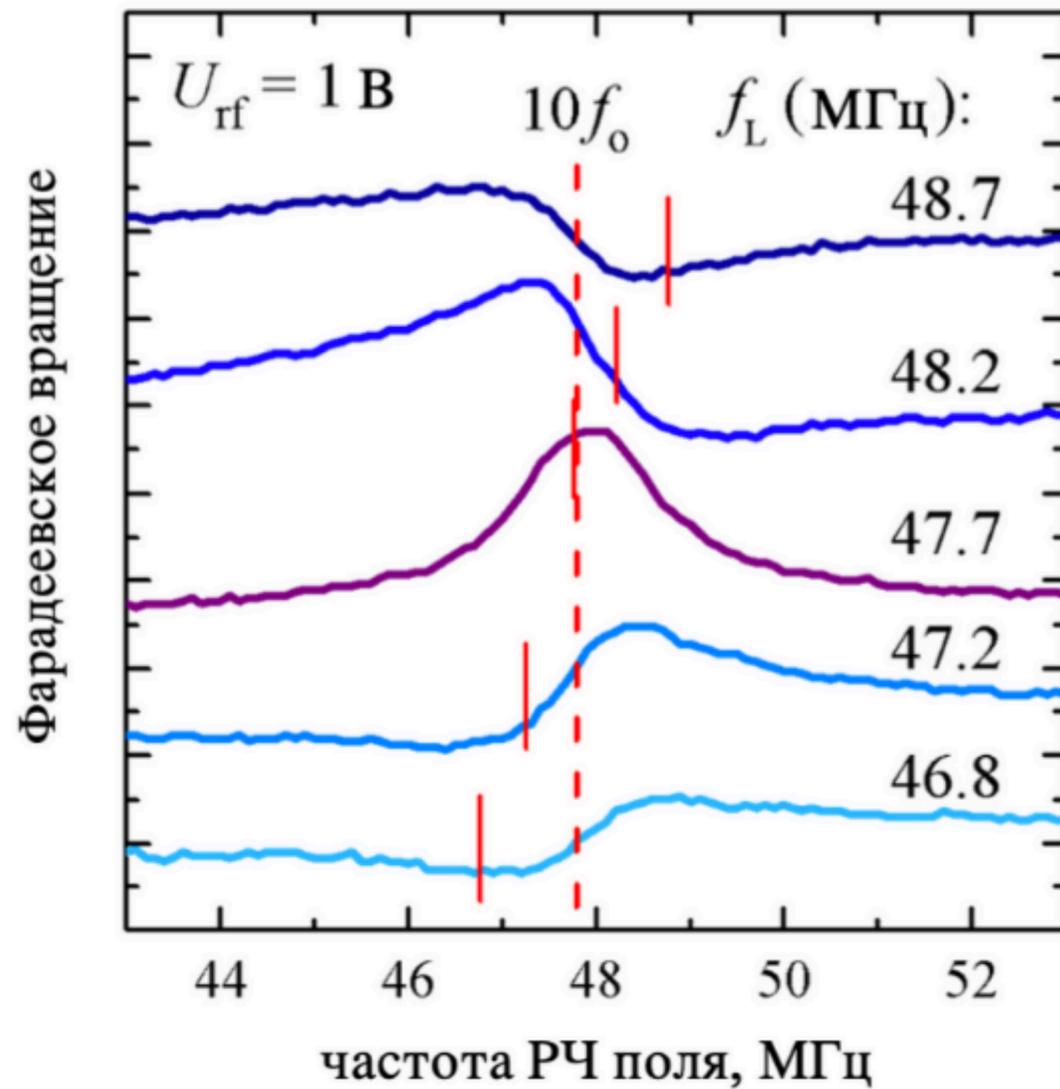
Комбинированный резонанс на трех частотах:

- **Частота f_{RF}** : периодического РЧ поля
- **Ларморовская частота f_L** : вращение в постоянном магнитном поле
- **Частота повторения f_o** : частота следования лазерных импульсов

$$f_{RF} = f_L = n f_o$$

Комбинированный резонанс

ЭПР спектры для различных магнитных полей

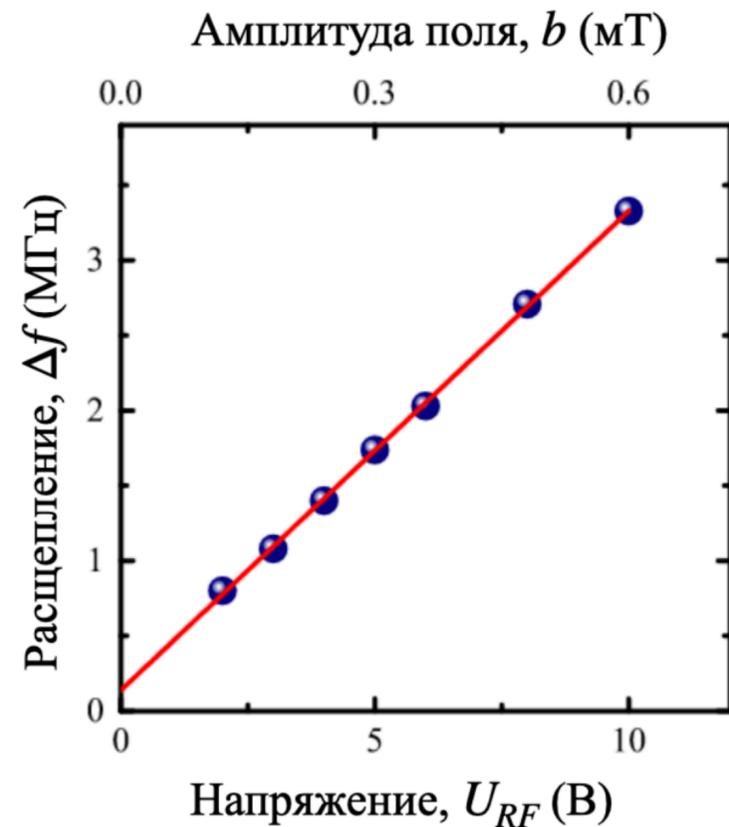
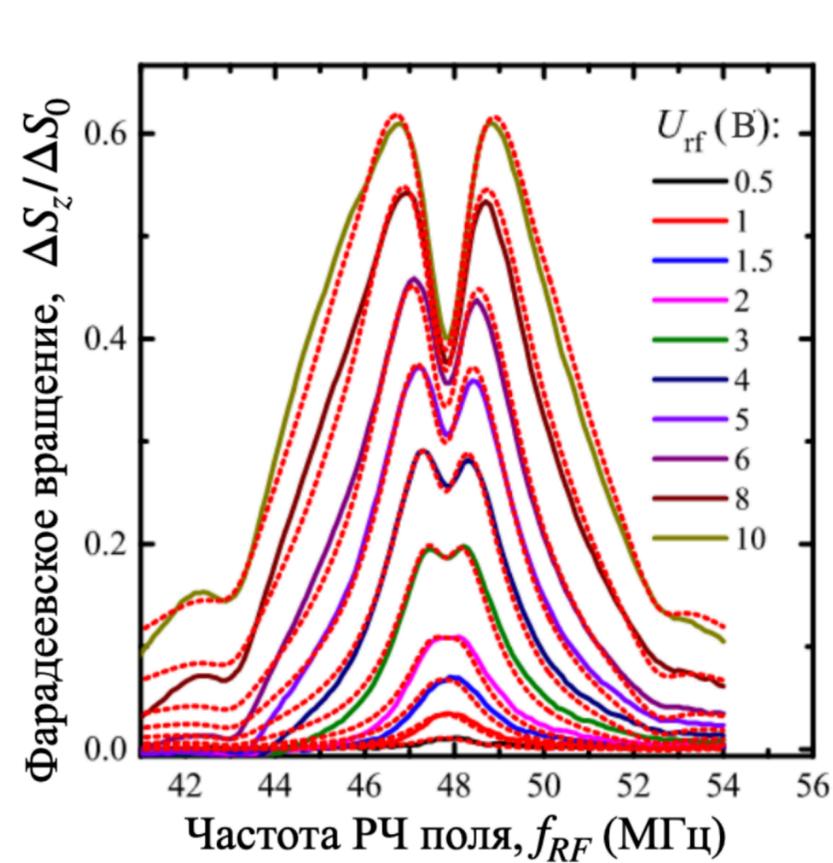


$$f_{RF} = f_L = 10f_0$$

В условиях РСУ влияние РЧ поля наиболее заметно.

Комбинированный резонанс

ЭПР спектры в зависимости от амплитуды РЧ поля



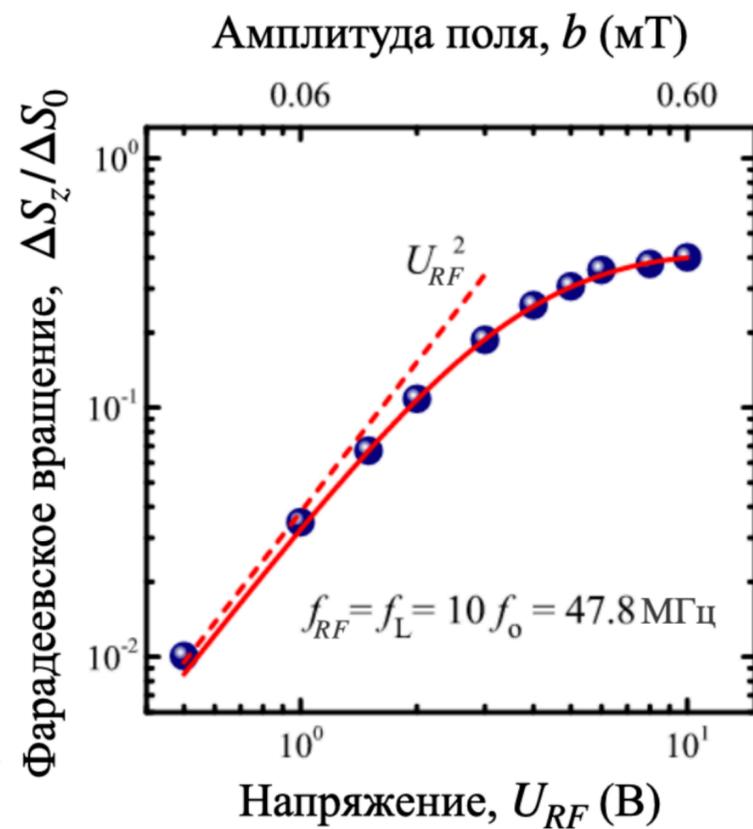
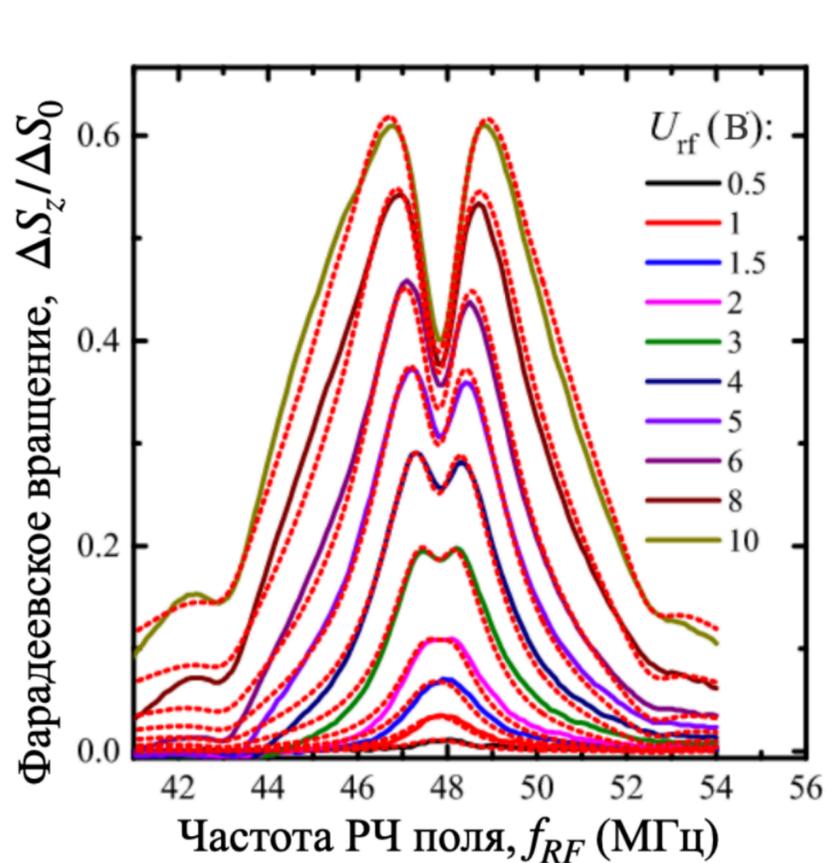
$$\Omega_{Rabi} = g\mu_B b / 2\hbar = 2\pi f_{Rabi}$$

Новое условие максимумов:

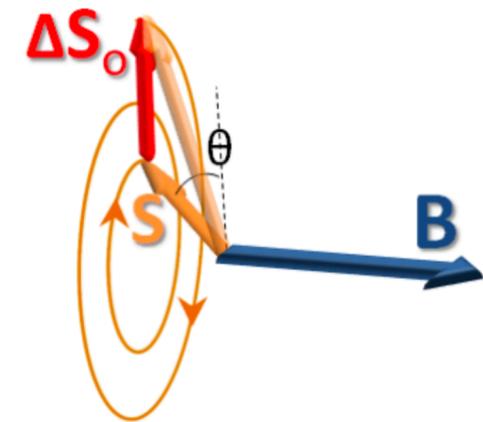
$$nf_0 = f_L \approx f_{RF} \pm f_{Rabi}$$

Комбинированный резонанс

ЭПР спектры в зависимости от амплитуды РЧ поля



ЭПР + РСУ



$$\Delta S_z \sim S_z (1 - \cos \theta) \sim S_z \theta^2 / 2 \propto b^2$$

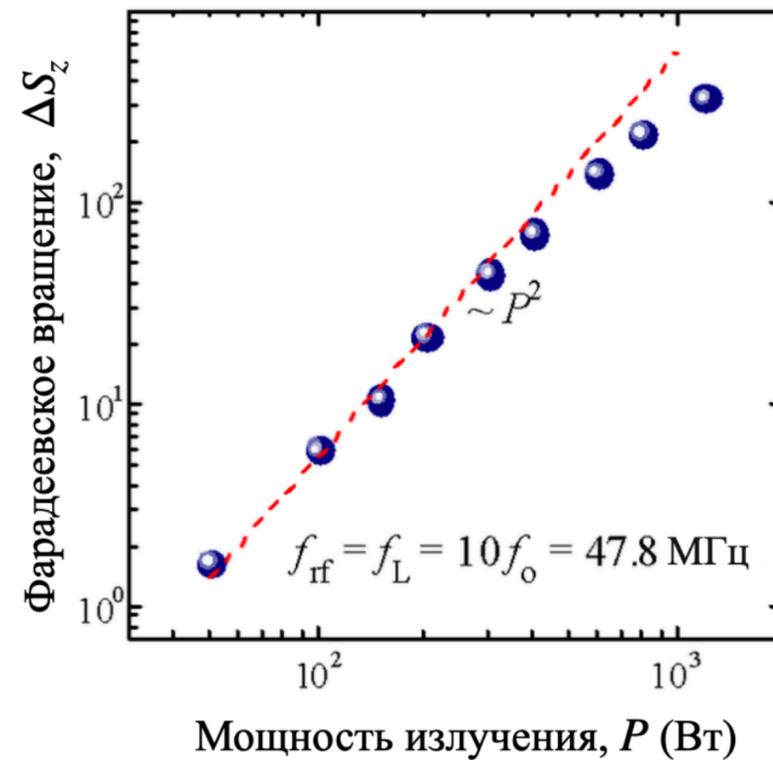
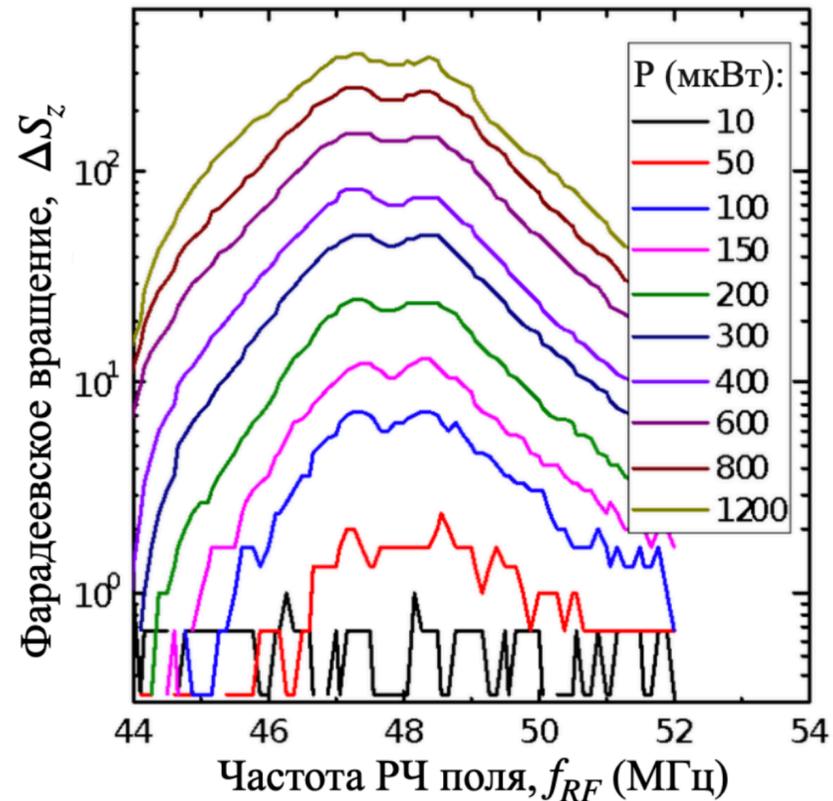
ЭПР : $\Delta S_z \sim U$

ЭПР + РСУ : $\Delta S_z \sim U^2$

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{S} - \frac{\mathbf{S}}{\tau_s} + \Delta S_0 \sum_n \delta(t - nT_0)$$

Комбинированный резонанс

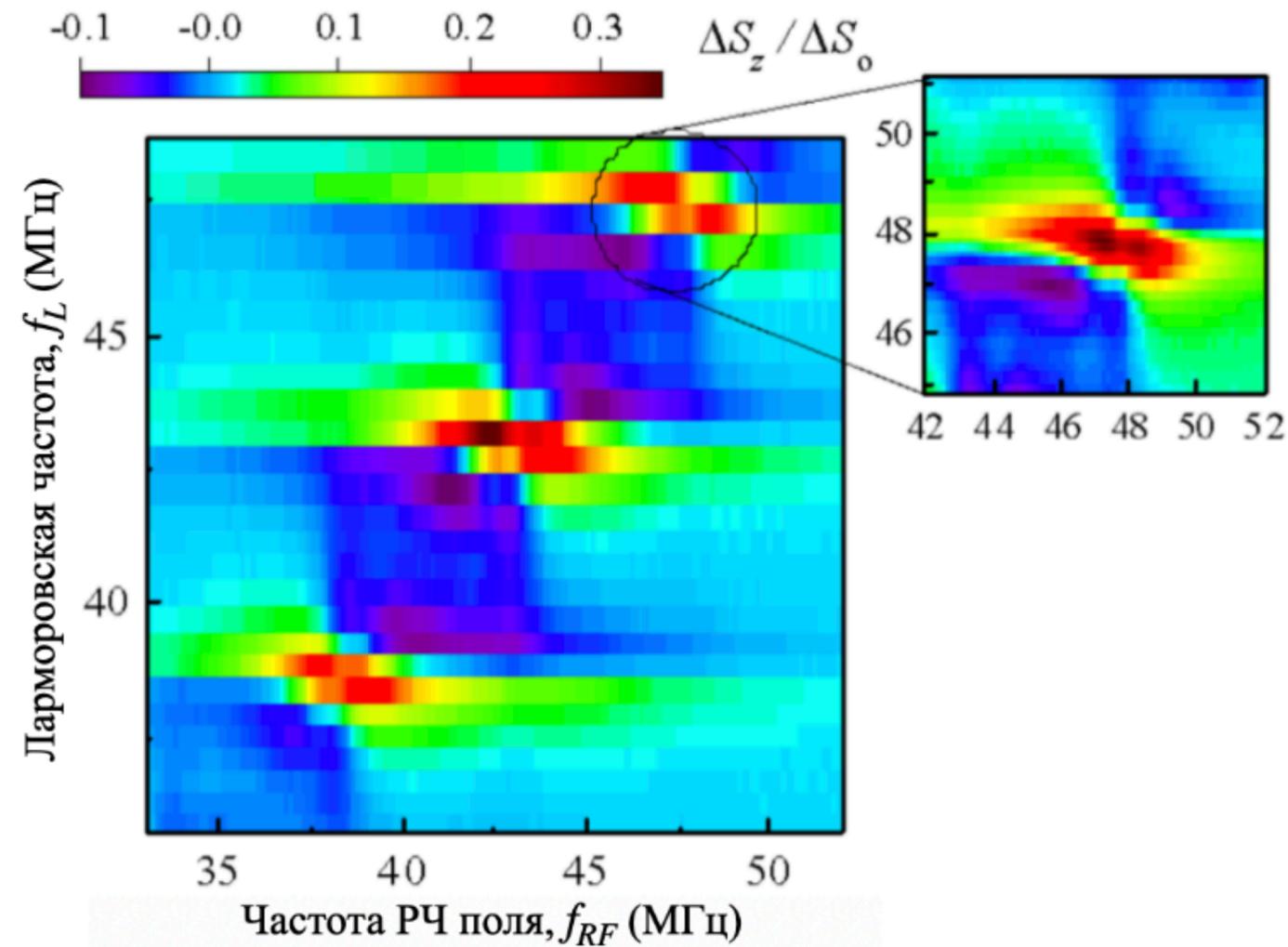
ЭПР спектры для различной мощности излучения



$$\Delta S_z \sim P_{pump} * P_{probe}$$

Комбинированный резонанс

2D Карта комбинации эффектов



$$f_{RF} = f_L = n f_0$$

- Выраженные пики при $n = 8, 9, 10$
- “Чистые” ЭПР пики неразличимы

Итоги

- * В ходе поиска метода измерения времени поперечной спиновой релаксации было обнаружено нетипичное поведение пиков ЭПР.
- * Источником такого поведения оказался эффект РСУ - синхронной накачки спинов периодическими лазерными импульсами циркулярной поляризации
- * Был представлен модифицированный однолучевой метод РСУ позволяющий наблюдать сигнал, пропорциональный производной спиновой поляризации по величине постоянного магнитного поля.
- * Было изучено поведение системы при комбинации двух резонансов и произведено наблюдение двойного резонанса
- * Основным результатом стало значительное усиление сигнала ЭПР в условиях двойного резонанса
- * По результатам исследования опубликована статья *Resonant spin amplification meets electron spin resonance in n-GaAs* V. V. Belykh, D. N. Sob'yanin, and A. R. Korotneva *Phys. Rev. B* 102, 075201, 2020

