

**Выпускная квалификационная работа «Селективный  
экспресс-метод измерения времени продольной спиновой  
релаксации в твердотельных системах»**

Кравцов Михаил Викторович

15 февраля 2022 г.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Измерение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Магнитное поле в образце</b>	<b>4</b>
2.1	Вычисление поля в образце . . . . .	4
2.2	Длина проволоки . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Геометрия установки</b>	<b>4</b>
3.1	Прототип на 3D принтере . . . . .	5

# 1 Измерение

Уравнение на эволюцию спина состоит из двух слагаемых: накачки и релаксации:

$$\frac{dS}{dt} = P - \frac{S}{T}$$

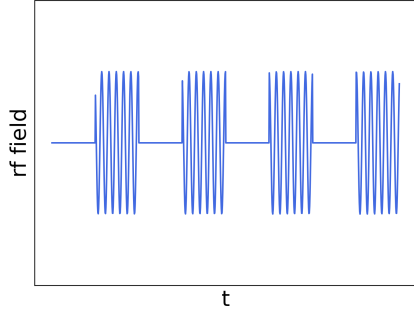


Рис. 1: Модуляция радиочастотного поля по времени

На рис. 1 видно, что половину периода синхронного детектирования рч-поле выключено и спины релаксируют со временем  $T_1$ , тогда как во второй половине периода в релаксацию вмешивается рч-поле, что меняет время релаксации на  $T_1'$ .

Таким образом, возбуждение спинов под действием рч-поля будет обладать следующей зависимостью:

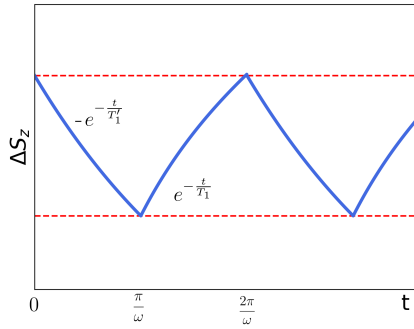


Рис. 2: Изменение проекции спина на ось, параллельную направлению магнитного поля,  $\Delta S_z(t)$

$$S_{off} = PT_1 + (S_0 - PT_1)e^{-\frac{t}{T_1}}, \quad t \in \left(0, \frac{\pi}{\omega}\right) \quad (1)$$

$$S_{on} = PT_1' + (S_0 - PT_1')e^{-\frac{t}{T_1'}}, \quad t \in \left(\frac{\pi}{\omega}, \frac{2\pi}{\omega}\right) \quad (2)$$

Измерение проводилось методикой синхронного детектирования, таким образом, для получения сигнала, нужно свернуть (1), (2) с  $\cos \omega t$  и  $\sin \omega t$ , соответственно.

$$\begin{aligned} Re(ESR) &\simeq \omega \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} e^{-\frac{t}{T_1}} \cos(\omega t) dt + \omega \int_{\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}} e^{-\frac{t}{T_1}} \cos(\omega t) dt = \\ &= \frac{\omega T_1 (S_0 - PT_1) \left( e^{-\frac{\pi}{\omega T_1}} + 1 \right)}{1 + T_1^2 \omega} + \frac{\omega T_1' (S_0 - PT_1') \left( e^{-\frac{\pi}{\omega T_1'}} + e^{-\frac{2\pi}{\omega T_1'}} \right)}{1 + T_1'^2 \omega} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Im(ESR) &\simeq \omega \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} e^{-\frac{t}{T_1}} \sin(\omega t) dt + \omega \int_{\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}} e^{-\frac{t}{T_1}} \sin(\omega t) dt = \\ &= \frac{\omega^2 T_1^2 (S_0 - PT_1) \left( e^{-\frac{\pi}{\omega T_1}} + 1 \right)}{1 + T_1^2 \omega} + \frac{\omega^2 T_1'^2 (S_0 - PT_1') \left( e^{-\frac{\pi}{\omega T_1'}} + e^{-\frac{2\pi}{\omega T_1'}} \right)}{1 + T_1'^2 \omega} \end{aligned}$$

При условии  $\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1'} \ll 1$ :

$$ESR \approx \sqrt{\frac{1}{1 + \omega^2 T_1^2}} \quad (9)$$

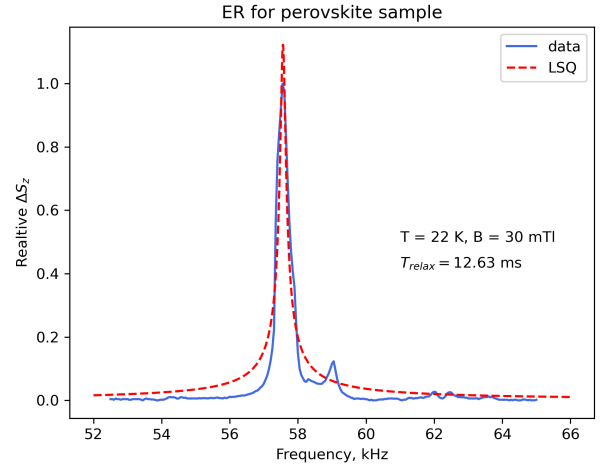


Рис. 3: Резонанс в кристалле перовскита, детектируемый оптически с аппроксимацией согласно (9)

## 2 Магнитное поле в образце

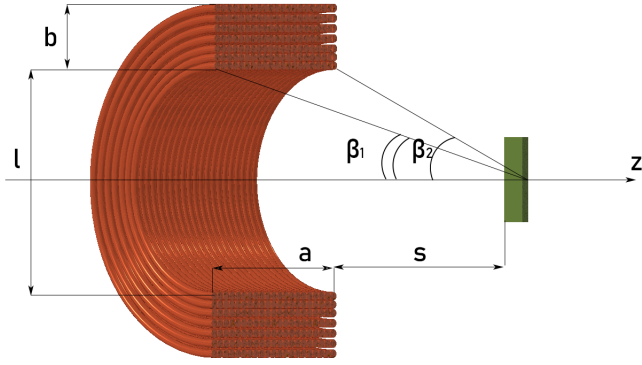


Рис. 4: Геометрия сверхпроводящей проволоки, относительно образца.  $a$  - ширина соленоида,  $b$  - высота,  $s$  - расстояние от крайней точки соленоида до образца,  $l$  - диаметр трубки

Соленоид представляет из себя витки сверхпроводящей проволоки диаметром  $d$ , огибающей трубку.

### 2.1 Вычисление поля в образце

Рассмотрим 1 виток проволоки. Найдем поле на ее оси.

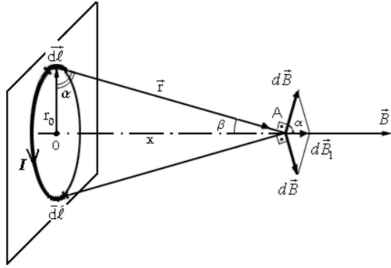


Рис. 5: Поле от витка

По закону Био-Савара-Лапласа, модуль магнитной индукции  $\vec{B}$ :

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi r_0} \frac{I r_0^2}{r^3} dl = \mu_0 \frac{I r_0^2}{2r^3} = \mu_0 \frac{I}{2r_0} \sin^3 \beta$$

Магнитное поле от кольцевого тока  $Indx$  витка соленоида с линейной плотностью витков  $n$ .

$$dB = \mu_0 \frac{Indx}{2r_0} \sin^3 \beta = \{x = r_0 \cot(\beta)\} = -\frac{In \sin \beta d\beta}{2}$$

После интегрирования имеем

$$B = \mu_0 \frac{In}{2} (\cos(\beta_2) - \cos(\beta_1))$$

где  $\beta_2$  и  $\beta_1$  - углы, под которым из точки образца видны крайние точки соленоида на рис. 4

Рассмотрим поле, создаваемое первым рядом обмоток:

$$B_1 = \mu_0 \frac{I}{2d} \left( \frac{s+a}{\sqrt{(s+a)^2 + \frac{l^2}{4}}} - \frac{s}{\sqrt{s^2 + \frac{l^2}{4}}} \right)$$

Рассмотрим произвольный  $y$  ряд обмоток. Поле, создаваемое им:

$$B_y = \mu_0 \frac{I}{2d} \left( \frac{s+a}{\sqrt{(s+a)^2 + (\frac{l}{2} + d*y)^2}} - \frac{s}{\sqrt{s^2 + (\frac{l}{2} + d*y)^2}} \right)$$

Суммируя все вклады, получим

$$B_{tot} = \sum_{y=0}^{N_b-1} B_y$$

Для характерных параметров:  $I = 30 \text{ A}$   $a = 1 \text{ cm}$   $b = 0.2 \text{ cm}$   $d = 0.3 \text{ mm}$

Зависимость поля от расстояния до образца:

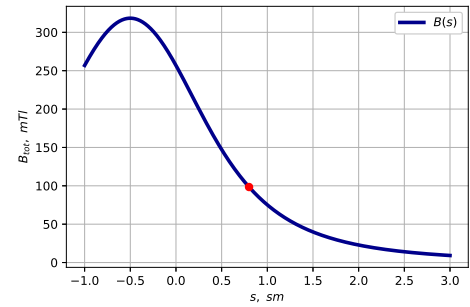


Рис. 6: Зависимость поля в образце от его расстояния до соленоида

Для расстояния  $s = 0.45 \text{ cm}$   $B_{tot} \approx 157 \text{ mT}$

### 2.2 Длина проволоки

Посчитать число витков можно исходя из рис. 4. Число "строк"  $N_a = \frac{a}{d} = \frac{1}{0.025} = 40$ , число "столбцов"  $N_b = \frac{b}{d} = \frac{0.2}{0.025} = 8$ .

Таким образом, в соленоиде будет 320 витков со средним радиусом  $\langle r \rangle = \frac{l}{2} + \frac{b}{2} = 1.1 \text{ cm}$ . То есть, длина проволоки  $L = 2\pi \langle r \rangle N_{tot} \approx 22 \text{ m}$

## 3 Геометрия установки

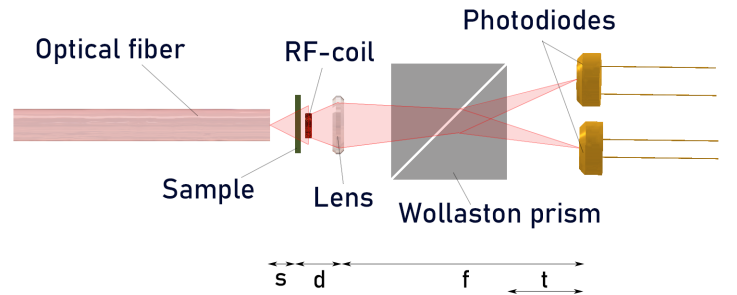


Рис. 7: Схема взаимного расположения образца, линзы и лучеделителя.  $s$  - расстояние от образца до выхода оптоволокна,  $d$  - расстояние от образца до линзы,  $f$  - расстояние от линзы до фотодиодов,  $t$  - расстояние от лучеделителя до фотодиодов,  $D$  - диаметр линзы.

При желаемом размере пятна на образце в  $d' = 1 \text{ mm}$  и угле апертуры волокна  $\alpha \approx 0.22 \text{ rad} \approx 12.7^\circ$  найдем  $s = \frac{d'}{2} \frac{1}{\tan(\alpha)} \approx 4.5 \text{ mm}$

Оценим  $d$  сверху, так как при сколь угодно большом  $d$ , пятно, приходящее на линзу будет превышать ее апертуру, вследствие чего будет собираться лишь часть света. Так как чистая апертура линз  $\approx 0.9 D$ , запишем

$$(d + s) \tan(\alpha) = a = \frac{0.9D}{2} \quad (10)$$

Условием на схождение луча после линзы является

$$d + s > F = \frac{f(d + s)}{f + d + s} \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует, что  $\frac{f(d+s)}{f+d+s} - s < d < 20.8 \text{ mm}$

Условие на  $f$ : при малом  $f$  пятно на лучеделителе будет больше его апертуры, из-за чего будут потери в интенсивности.

Из подобия, найдем оценку на  $f$  снизу:

$$\frac{2a}{f} = \frac{0.9A}{L}$$

Таким образом,

$$f > \frac{DL}{A}$$

Из всех условий целесообразно использовать линзу с  $F = 14.9 \text{ mm}$ ,  $D \approx 12.7 \text{ mm}$  и лучеделитель с  $L = 30 \text{ mm}$  и  $A = 8 \text{ mm}$

Тогда при  $d = 13.5 \text{ mm}$ ,  $f = 90 \text{ mm}$  расстояние от линзы до лучеделителя составит  $f - f_{\min} \approx 42 \text{ mm}$ , расстояние от лучеделителя до фотодиодов  $t \approx 18 \text{ mm}$

### 3.1 Прототип на 3D принтере

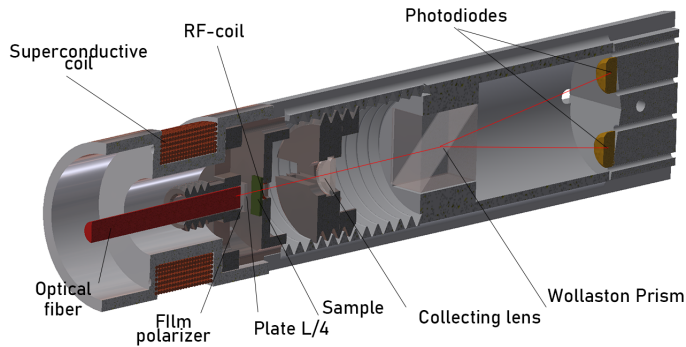


Рис. 8: Макет вставки, разработанный в среде 3D моделирования

Отдельные части компактного ОДМР-спектрометра напечатаны на 3D принтере так, чтобы вместе формировать готовую установку. В частности, было напечатано 6 составных частей - бабина для сверхпроводящей проволоки, держатель оптоволокну, держатель образца с рч-катушкой, держателей фотодетекторов и держатель линзы с внешней нарезкой, позволяющей юстировать линзу вдоль направления распространения луча, варьируя параметр  $d$  из рис. 7.

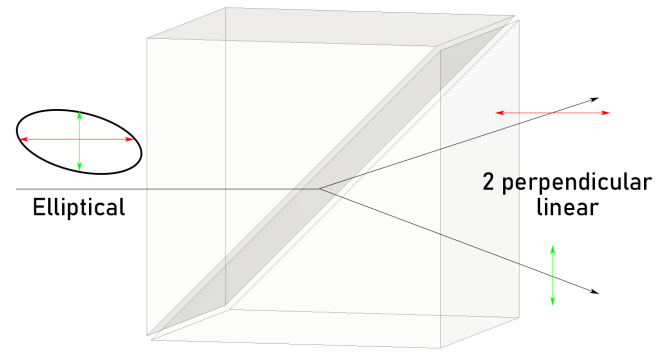


Рис. 9: Призма Волластопа. На вход приходит свет, поляризованный эллиптически, на выходе - 2 луча линейных перпендикулярных поляризаций.

### Список литературы