Электронный спиновый резонанс в твердых растворах замещения $Eu_{1-x}Ca_xB_6$ и $Eu_{1-x}Gd_xB_6$

Самарин А.Н.[1,2], Семено А.В.[1], Гильманов М.И.[1,2], Анисимов М.А.[1], Глушков В.В.[1,2], Демишев С.В.[1], Левченко А.В.[3], Филипов И.Б.[3], Шицевалова Н.Ю.[3]

[1]*Институт общей физики им. А.М.Прохорова, ОНТиКТ, Москва*
[2]*Московский физико-технический институт, ФПФЭ, Долгопрудный*
[3]*Институт проблем материаловедения им. И.Францевича НАНУ, Киев*

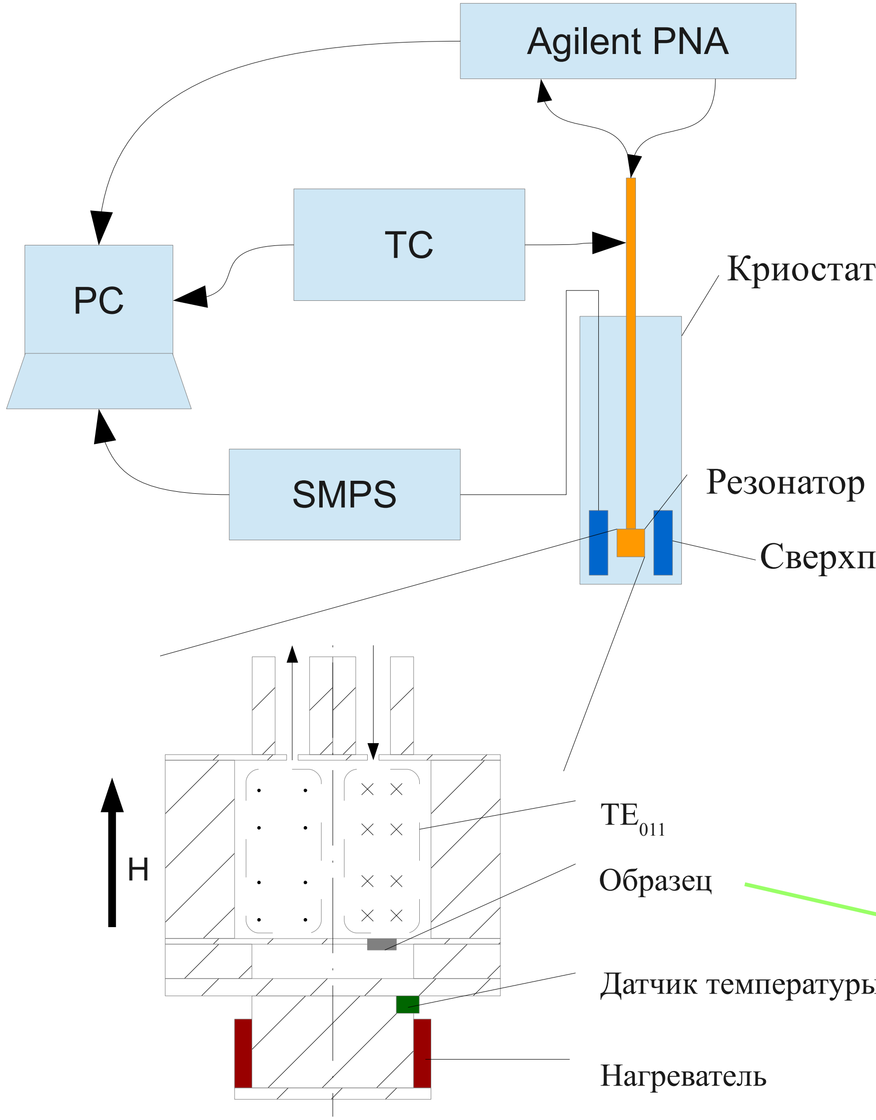
Low Temperatures and Cryogenic Engineering Department MMII

IOF RAN

План доклада

- Описание экспериментальной установки и методики измерений ЭСР в металлах с сильными электронными корреляциями
- Методика обработки и результаты исследования $Eu_{1-x}Gd_xB_6$
- Методика обработки и результаты исследования $Eu_{1-x}Ca_xB_6$
- Выводы

Схема экспериментальной установки и геометрия эксперимента



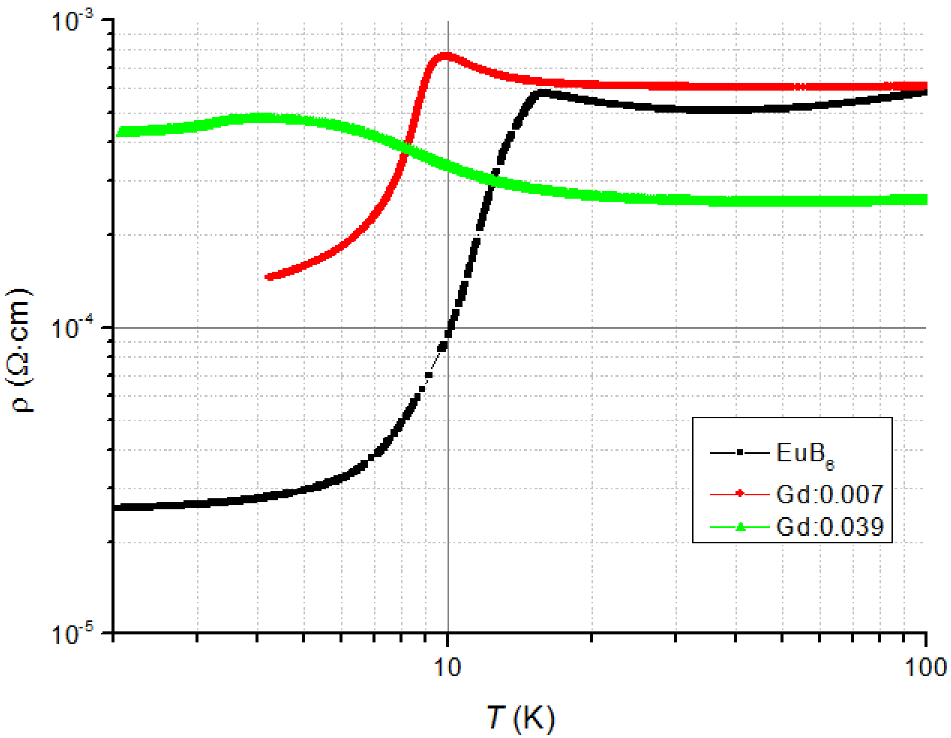
Основная рабочая мода – TE_{011}, частота – 60 ГГц

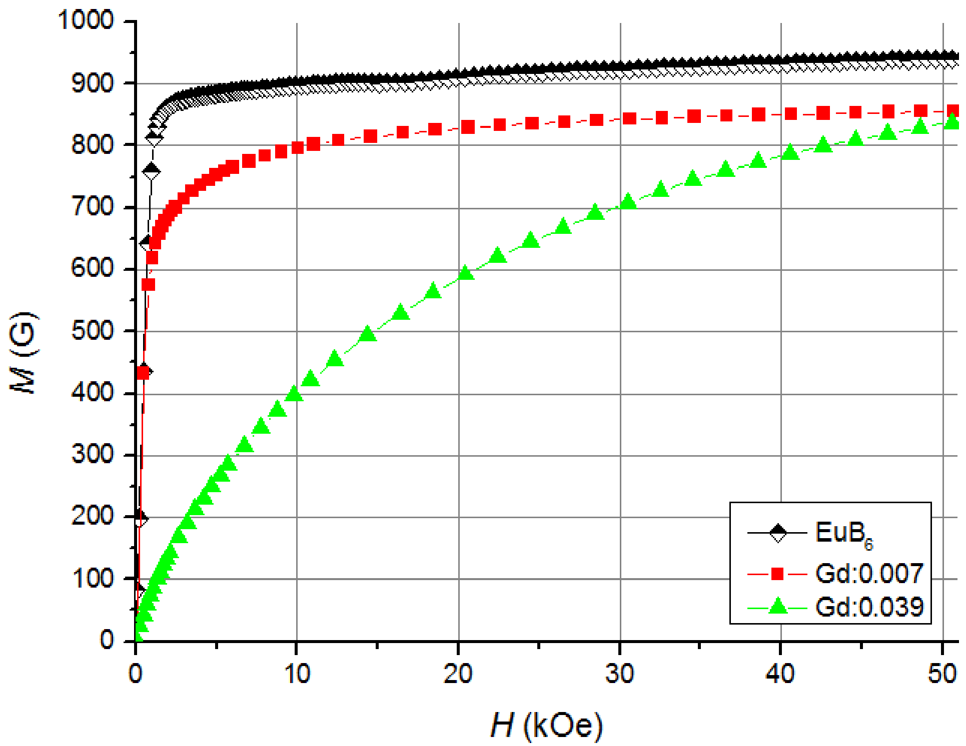
Agilent PNA E8361C — векторный анализатор цепей
TC — температурный контроллер
(Cryotel Model TC1.5/300 Temperature Controller)
SMPS — источник тока сверхпроводящего магнита
(Cryotel Model 100 SMPS)

Напряженность магнитного поля:	до 7 Тл
Диапазон температур:	1.8 – 300 К
Стабилизация температуры:	**0.001К** при T < 40K
Частота СВЧ-излучения:	до 67 ГГц
Отношение сигнал/шум:	более 60 дБ

Low Temperatures and Cryogenic Engineering Department MMII

Статические свойства образцов $Eu_{1-x}Gd_xB_6$





Удельное сопротивление образцов EuB_6 и $Eu_{1-x}Gd_xB_6$, полученное из результатов измерений транспортных свойств (установка гальваномагнитных измерений ОНТиКТ ИОФ РАН)

Статическая намагниченность образцов EuB_6 и $Eu_{1-x}Gd_xB_6$, полученная из результатов SQUID-измерений (MPMS-5, Quantum Design)

Методика абсолютной калибровки кривых поглощения ЭСР

Общее решение уравнения движения намагниченности Ландау-Лифшица (модель локализованных магнитных моментов):

$$\vec{B}=\hat{\mu}\vec{H}$$

$$\hat{\mu}=\begin{vmatrix} \mu_0 & i\mu_a & 0 \\ -i\mu_a & \mu_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\mu_0+\mu_a=\mu_1^+ - i\mu_2^+$$
$$\mu_0-\mu_a=\mu_1^- - i\mu_2^-$$

$$\mu_1^+ = 1+4\pi\frac{\gamma M_0((1+\alpha^2)\omega_0-\omega)}{(\omega_0-\omega)^2+\alpha^2\omega_0^2}$$

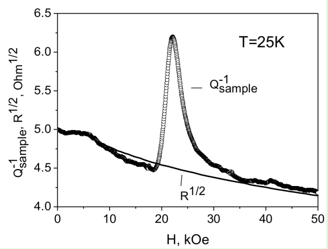
$$\mu_1^- = 1+4\pi\frac{\gamma M_0((1+\alpha^2)\omega_0+\omega)}{(\omega_0+\omega)^2+\alpha^2\omega_0^2}$$

$$\mu_2^+ = 4\pi\frac{\gamma M_0\alpha\omega}{(\omega_0-\omega)^2+\alpha^2\omega_0^2}$$

$$\mu_2^- = 4\pi\frac{\gamma M_0\alpha\omega}{(\omega_0+\omega)^2+\alpha^2\omega_0^2}$$

$$Q^{-1}=Q_{res}^{-1}+Q_{sample}^{-1}$$
$$Q_{sample}^{-1}\sim\Re\left[i\frac{\mu}{\sigma}\right]^{1/2}$$
$$\mu=1+4\pi\chi$$
$$\mu=\mu_1-i\mu_2$$
$$\chi=\chi_1-i\chi_2$$

Q — добротность нагруженного резонатора
Q_{res} — добротность ненагруженного резонатора
Q_{sample} — потери, вносимые образцом
μ — высокочастотная магнитная проницаемость
σ — комплексная проводимость образца



Потери, вызванные образцом, в единицах $R^{1/2}$. Сплошная линия – потери, обусловленные проводимостью образца без учета высокочастотной магнитной проницаемости

ω — частота СВЧ колебаний
α — коэффициент диссипации
g — g-фактор
M_0 — осциллирующая намагниченность

γ — гиромагнитное соотношение
N_z — размагничивающий фактор
M — статическая намагниченность
H — напряженность внешнего магнитного поля

$$\gamma=g\frac{\mu_B}{\hbar}$$

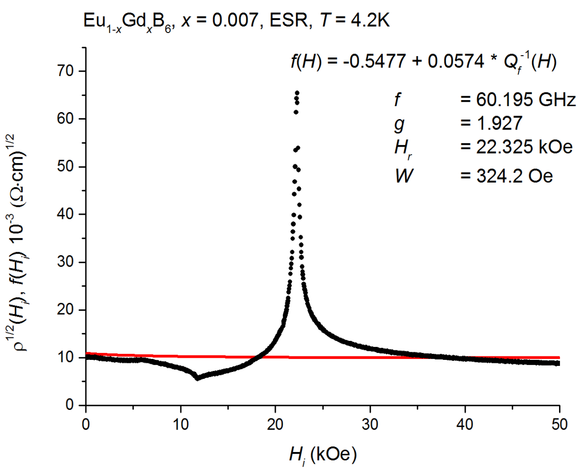
$$\omega_0=\gamma(H-4\pi N_z M)$$

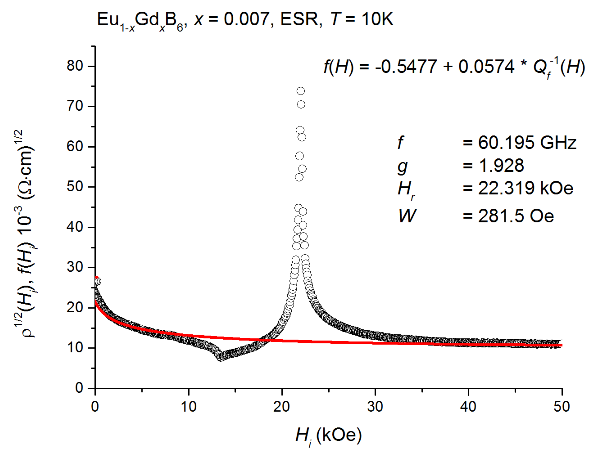
$$Q_{sample}^{-1}\sim\frac{1}{2}\left[\sqrt{\sqrt{\mu_1^{+\,2}+\mu_2^{+\,2}}+\mu_2^+}+\sqrt{\sqrt{\mu_1^{-\,2}+\mu_2^{-\,2}}+\mu_2^-}\right]$$

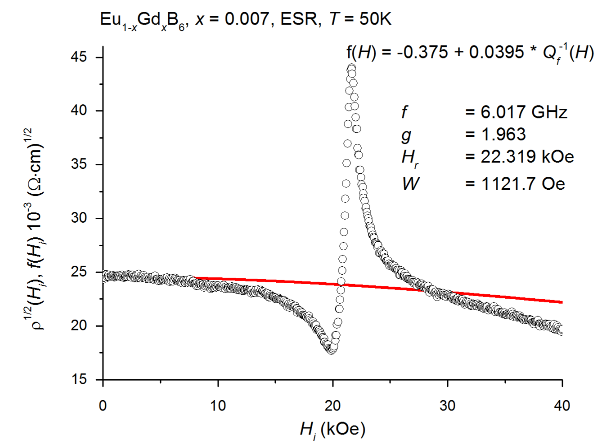
A.V. Semeno, et al., Phys. Rev. B, 79, 014423 (2009)
J. Young and E. Uehling, Phys. Rev. 94, 544 (1954)

ЭСР в $Eu_{1-x}Gd_xB_6$ (x = 0.007)

Поглощение, $\rho^{1/2}(H)$

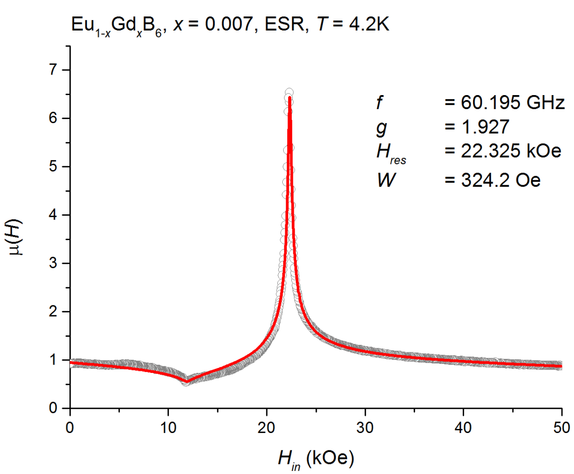


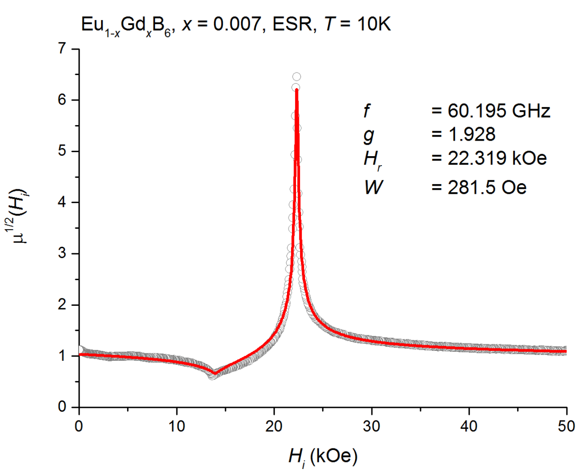


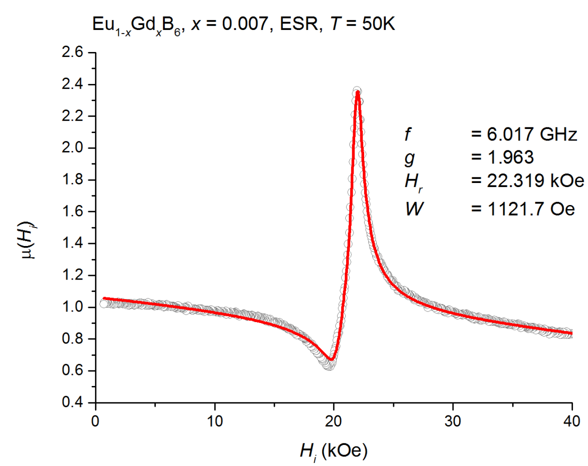


T = 4.2K T = 15K T = 50K

ВЧ м.проницаемость, fits





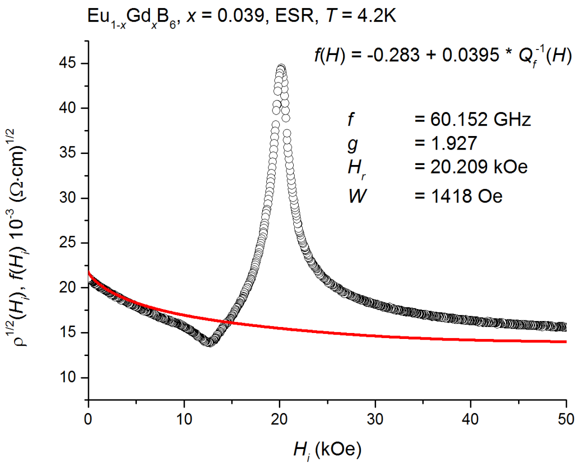


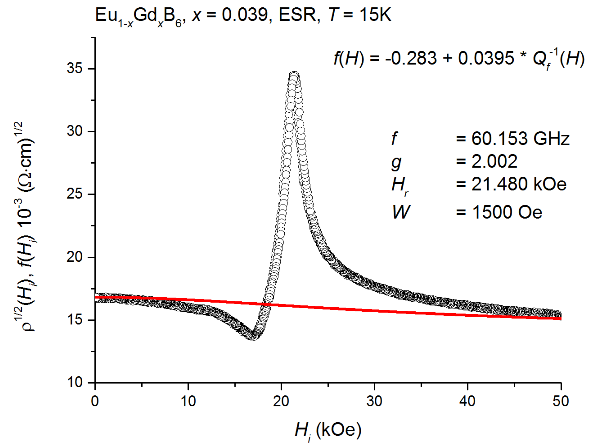
Черные точки соответствуют экспериментальным кривым,
красные линии – аппроксимация экспериментальных кривых модельной функцией.

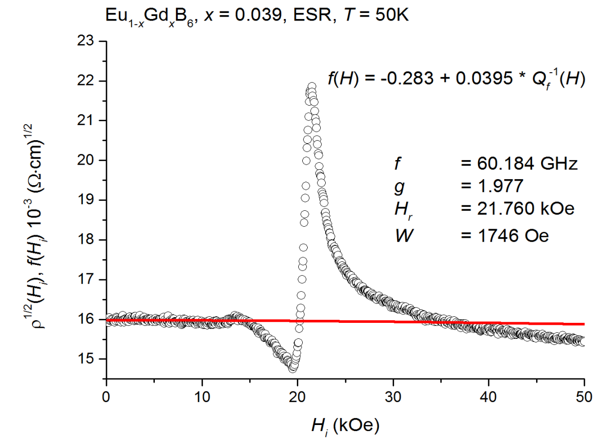
Параметры аппроксимации: *α, g, M_0*

ЭСР в $Eu_{1-x}Gd_xB_6$ (x = 0.039)

Поглощение, $\rho^{1/2}(H)$





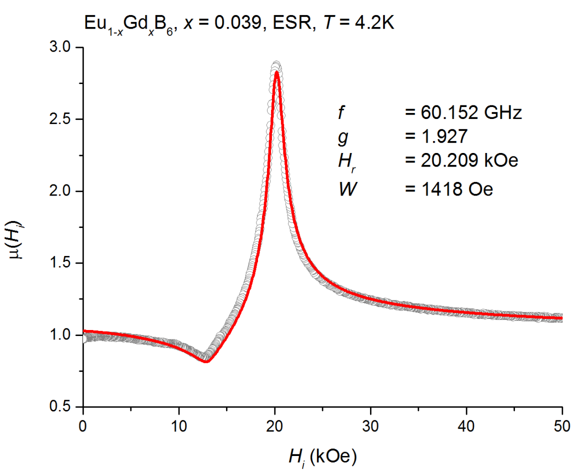


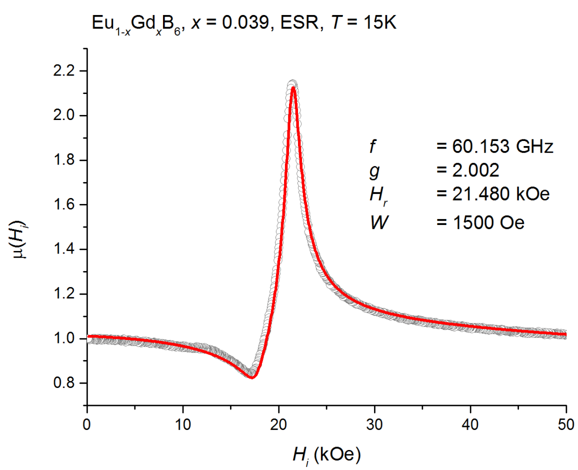
T = 4.2K

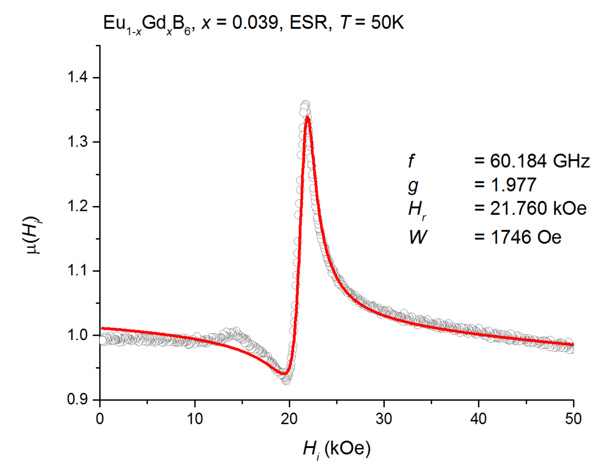
T = 15K

T = 50K

ВЧ м.проницаемость, fits



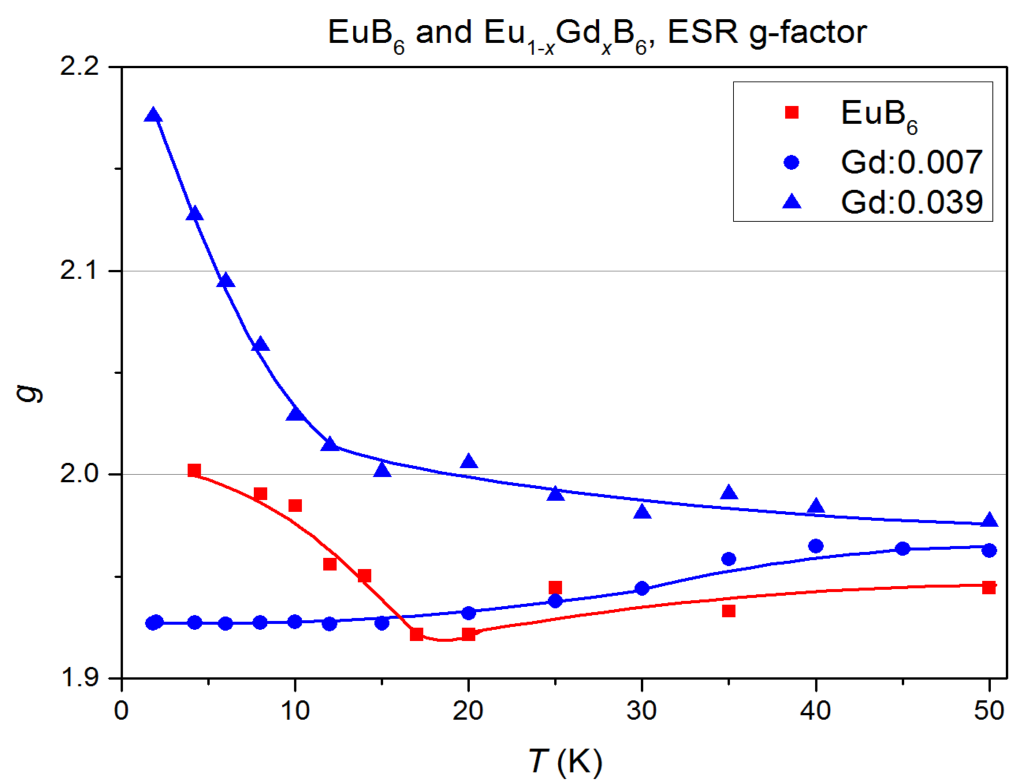


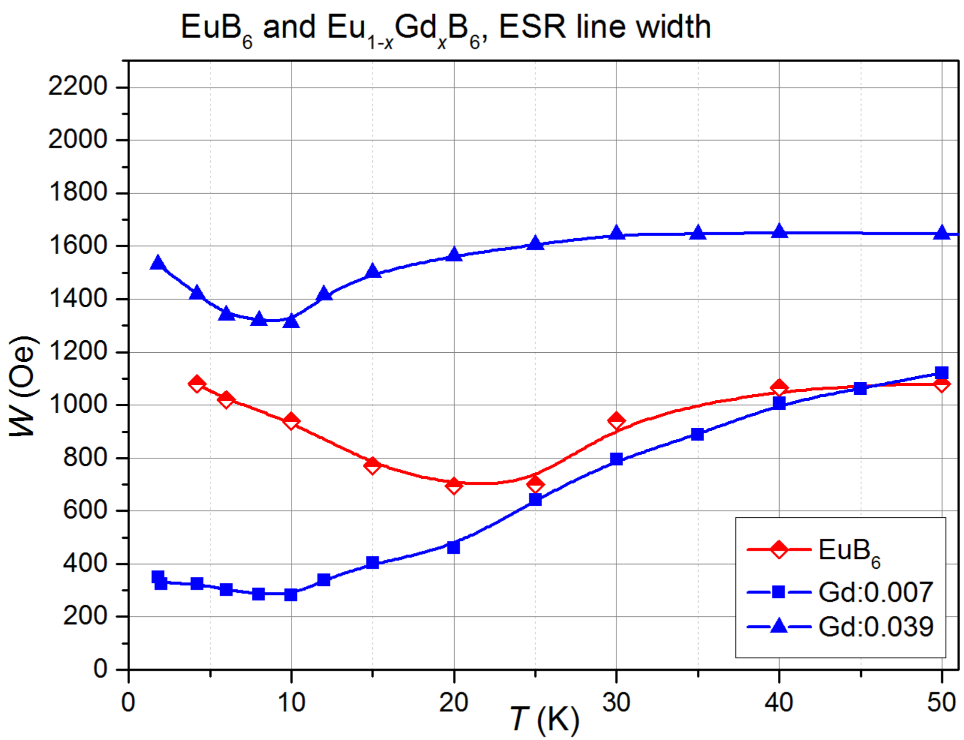


Черные точки соответствуют экспериментальным кривым,
красные линии – аппроксимация экспериментальных кривых модельной функцией.

Параметры аппроксимации: α, g, M_0

Температурные зависимости параметров линии ЭСР в $Eu_{1-x}Gd_xB_6$

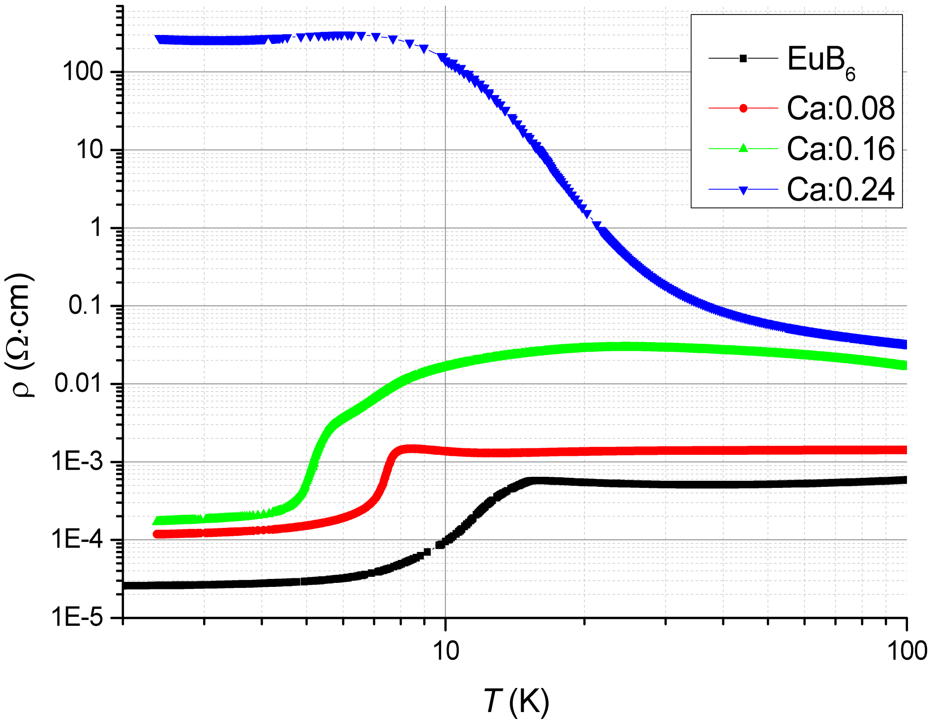


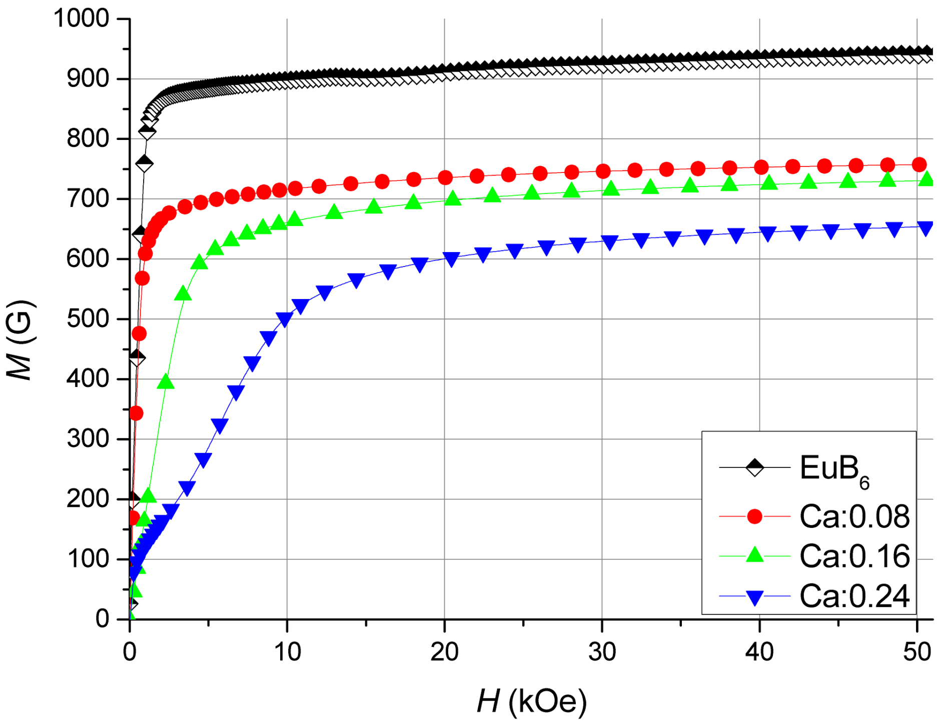


Линейную температурную зависимость $W(T)$ в парамагнитной области ($T > T_C$) можно объяснить корринговским механизмом рассеяния [1].

[1] S.E.Barnes, Advances in Physics, 30, 801 (1981)

Статические свойства образцов $Eu_{1-x}Ca_xB_6$



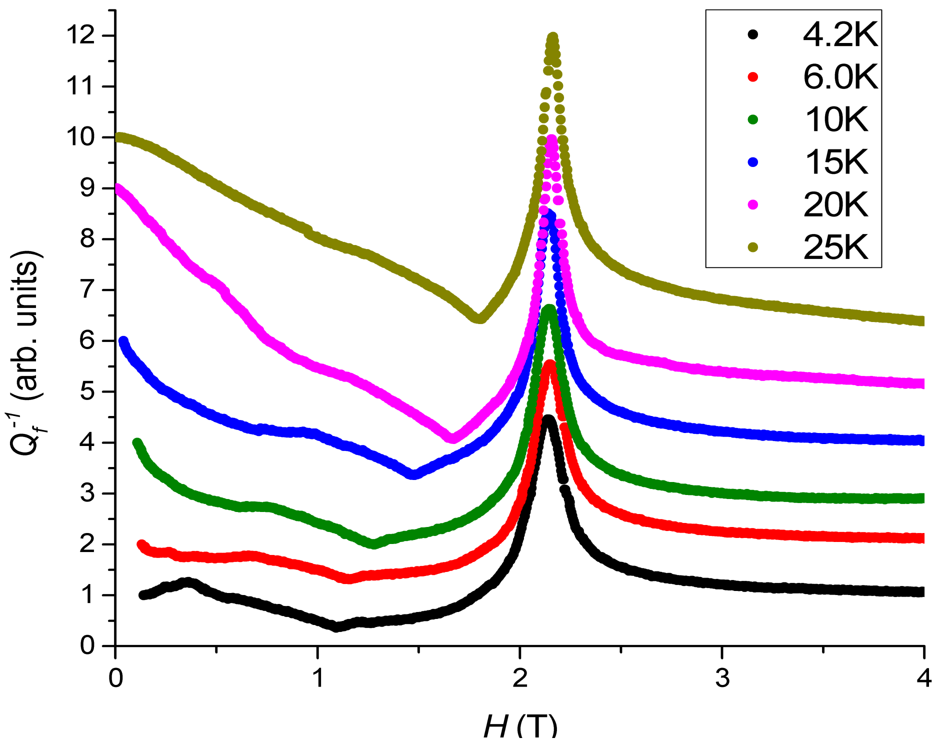


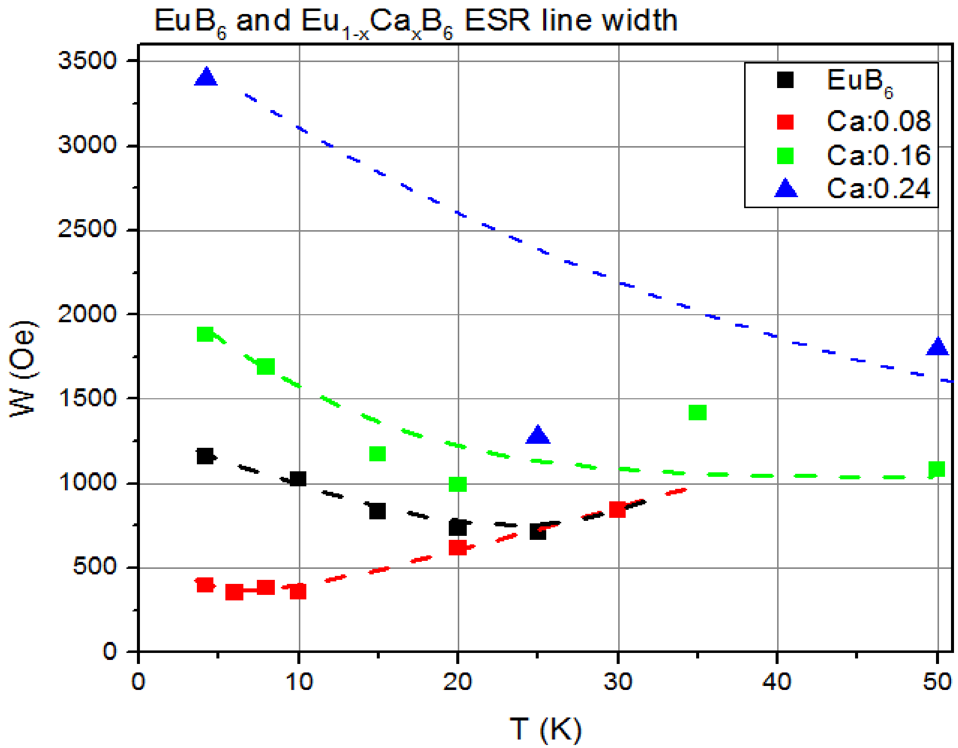
Удельное сопротивление образцов EuB_6 и $Eu_{1-x}Ca_xB_6$, полученное из результатов измерений транспортных свойств (установка гальваномагнитных измерений ОНТиКТ ИОФ РАН)

Статическая намагниченность образцов EuB_6 и $Eu_{1-x}Ca_xB_6$, полученная из результатов SQUID-измерений (MPMS-5, Quantum Design)

Low Temperatures and Cryogenic Engineering Department MMII

Применение стандартной методики к $Eu_{1-x}Ca_xB_6$





Исходные кривые резонансного поглощения в EuB_6. Все кривые сдвинуты для наглядности.

Температурные зависимости ширины линии ЭСР W(T) в EuB_6 и $Eu_{1-x}Ca_xB_6$.

g-фактор примерно постоянен: g ~ 1.95±0.05

Учет комплексной проводимости в $Eu_{1-x}Ca_xB_6$

В $Eu_{1-x}Ca_xB_6$ существенен вклад мнимой части комплексной проводимости.

$$M(\omega) = M'(\omega) + i M''(\omega)$$ ← Функция памяти

Модель Götze, Wölfle
[Phys.Rev.B 6, 1226 (1972)]

$$\sigma(\omega) = \frac{e^2 N}{m} \cdot \frac{i(\omega + M'(\omega)) + M''(\omega)}{(\omega + M'(\omega))^2 + (M''(\omega))^2}$$

Общие свойства:

$$M'(\omega) = -M'(-\omega)$$

$$M''(\omega) = M''(-\omega)$$

Минимальное предположение

$$M'(\omega) \approx M'(0) + \frac{\partial M'}{\partial \omega} \cdot \omega + \dots \rightarrow M'(0) = 0$$

$$M''(\omega) \approx M''(0)$$

$$\sigma(\omega) = \frac{e^2 N}{m} \cdot \frac{i\omega\left(1 + \frac{\partial M'}{\partial \omega}\right) + M''(0)}{\left[\omega\left(1 + \frac{\partial M'}{\partial \omega}\right)\right]^2 + (M''(0))^2}$$

Выбор функции *σ(ω, H)*:

σ(0, H) – DC магнитосопротивление (известно из эксперимента)

σ(0, 0) – DC проводимость в нулевом поле

Предположение:

$$\sigma(\omega = 0) = \sigma(0, H) = \frac{e^2 N}{m M''(0)}$$

$$M''(0) = \frac{e^2 N}{m \sigma(0, H)}$$

Учет комплексной проводимости в $Eu_{1-x}Ca_xB_6$

$$\sigma(\omega, H) = \sigma(0,H)\cdot\frac{i\omega\left(1+\frac{\partial M'}{\partial\omega}\right)\cdot\frac{m\sigma(0,H)}{e^2N}+1}{\left[\omega\left(1+\frac{\partial M'}{\partial\omega}\right)\cdot\frac{m\sigma(0,H)}{e^2N}\right]^2+1}$$

Выделяем полевой вклад:

$$\frac{1+\frac{\partial M'}{\partial\omega}}{e^2N}\cdot m\sigma(0,H) \equiv \frac{1+\frac{\partial M'}{\partial\omega}}{e^2N}\cdot m\sigma(0,0)\cdot\frac{\sigma(0,H)}{\sigma(0,0)} = \tau(T,\omega)\cdot\frac{\sigma_T(0,H)}{\sigma_T(0,0)}$$

$$\tau(T,\omega) = \frac{\sigma(0,0)}{e^2N/m}\left(1+\frac{\partial M'}{\partial\omega}\right)$$

В общем случае – функция температуры и частоты. В минимальном приближении не имеет частотной зависимости.

Итоговое выражение для проводимости:

$$\sigma(\omega, H, T) = \sigma_{DC}(H)\cdot\frac{i\omega\tau(T)\frac{\sigma_{DC}(H)}{\sigma_{DC}(0)}+1}{\left[\omega\tau(T)\frac{\sigma_{DC}(H)}{\sigma_{DC}(0)}\right]^2+1}$$

Выражение для аппрокимации экспериментальных кривых:

$$Q^{-1}_{sample} \sim \Re\left[i\omega\frac{(\mu+\mu_a)}{\sigma}\right]^{1/2} + \Re\left[i\omega\frac{(\mu-\mu_a)}{\sigma}\right]^{1/2}$$

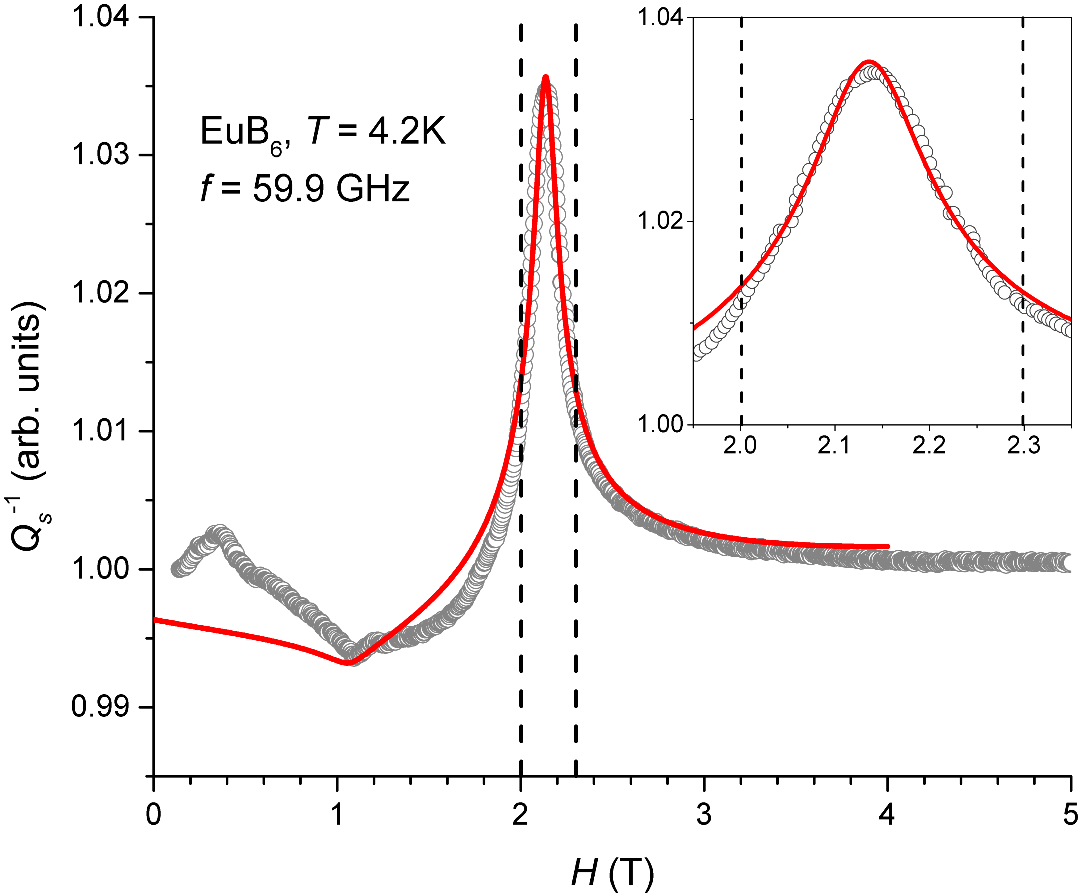
$$\mu\pm\mu_a = \mu_1^{\pm} - i\mu_2^{\pm}$$

Алгоритм обработки экспериментальных данных в $Eu_{1-x}Ca_xB_6$

Аппроксимация производится в два этапа.

На первом этапе задействована вся экспериментальная кривая, при аппроксимации подбирается осциллирующая намагниченность M_0, g-фактор и оценивается ширина линии.

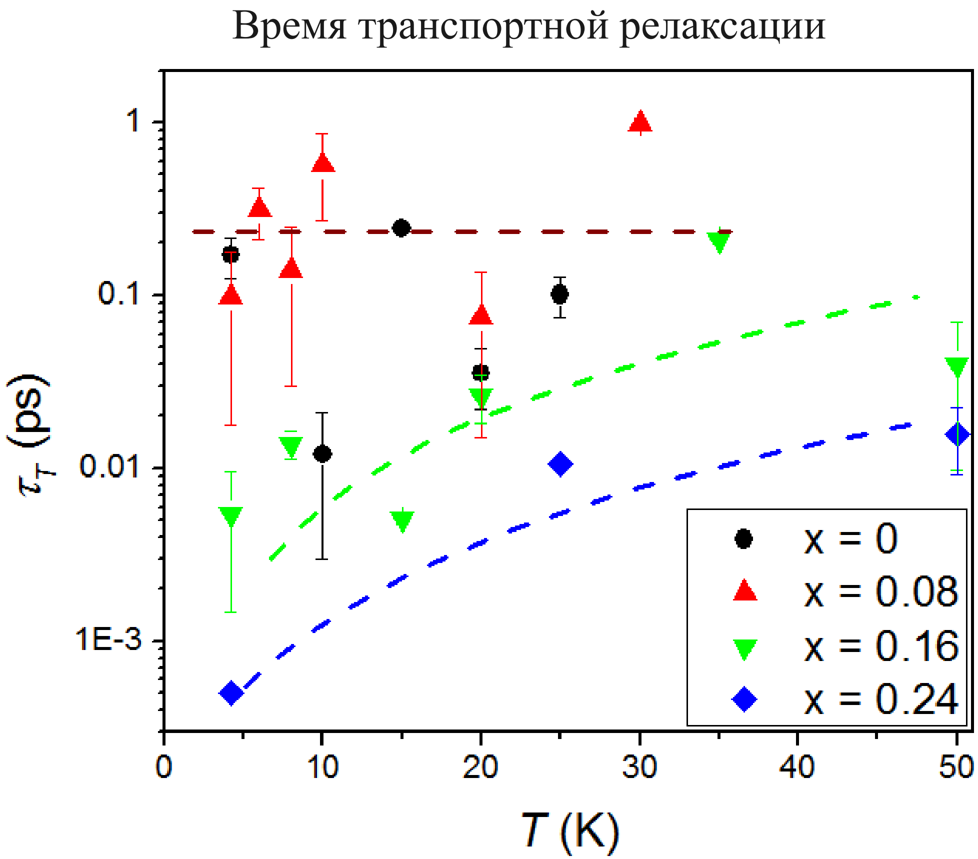
На втором этапе M_0 и g-фактор фиксируются и в узкой области резонанса подбирается ширина линии (или время спиновой релаксации) и время транспортной релаксации.

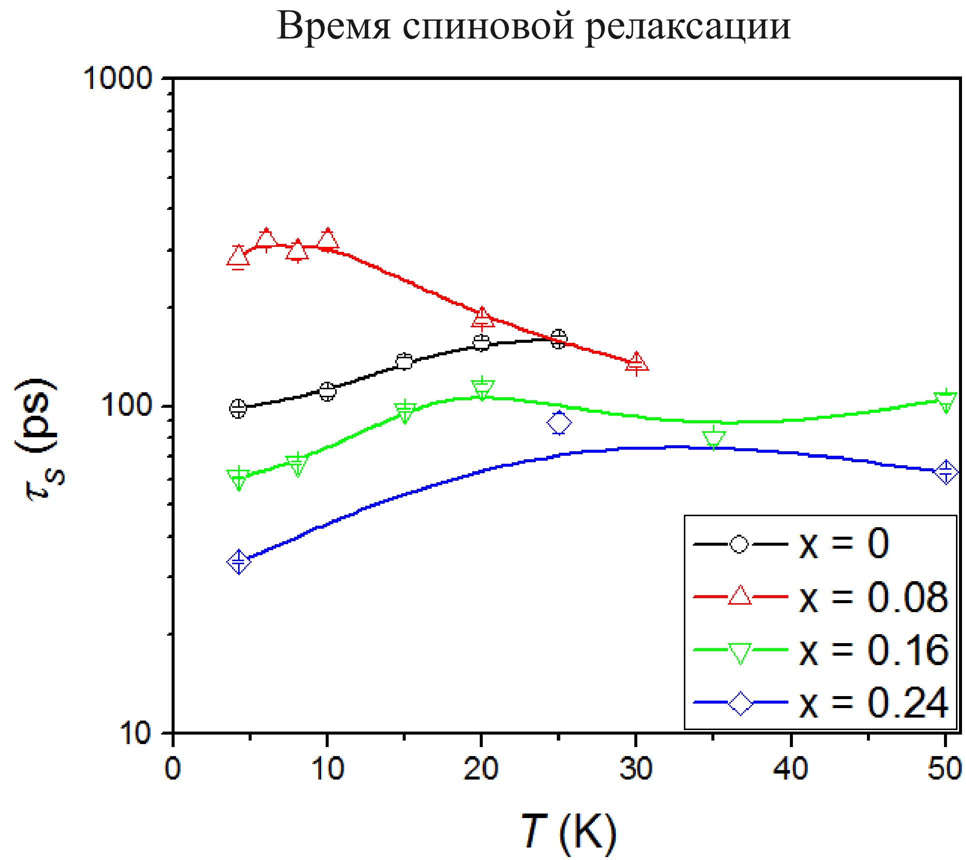


Серые точки соответствуют экспериментальным кривым,
красные линии – аппроксимация экспериментальных кривых модельной функцией.

Параметры аппроксимации: *α, g, M_0, τ*

Времена релаксации $Eu_{1-x}Ca_xB_6$





Все образцы исследованы на частоте **60 ГГц**.

Выводы

- Было произведено исследование электронного спинового резонанса в системах $Eu_{1-x}Ca_xB_6$ ($x < 0.25$) и $Eu_{1-x}Gd_xB_6$ ($x < 0.05$) в полях до 7 Т при температурах от 1.8 К до 50 К. Обнаружена немонотонная во всем диапазоне концентраций температурная зависимость ширины линии ЭСР $W(T)$.
- В парамагнитной фазе ($T > T_C$) видна линейная температурная зависимость $W(T)$. В магнитоупорядоченной фазе ($T < T_C$) наблюдается дополнительный механизм микроволновых потерь, приводящий к увеличению ширины линии ЭСР с понижением температуры.
- Увеличение концентрации примеси (до $x \sim 0.1$ для Ca и $x \sim 0.01$ для Gd) приводит к подавлению этого механизма. Дальнейшее увеличение концентрации еще сильнее увеличивает ширину линии во всем температурном диапазоне. Выяснение природы наблюдаемого эффекта требует проведения дополнительных исследований соединений на основе EuB_6.
- Разработана методика определения транспортного времени релаксации из ЭСР-эксперимента. Произведены оцененки времен спиновой и транспортной релаксации в системе $Eu_{1-x}Ca_xB_6$.

Работа поддержана грантом РФФИ 13-02-00160 и программами РАН «Электронный спиновый резонанс, спин-зависимые электронные эффекты и спиновые технологии» и «Электронные корреляции в системах с сильным взаимодействием».