

Спинволновая спектроскопия магнитных наноструктур

ФКС 2010

Л.В. Луцев



***Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН,
Политехническая ул., 26, Санкт-
Петербург, 194021, Россия***

I_lutsev@mail.ru

План изложения

- Типы спиновых волн в ферромагнитных пленках.
- Какие факторы влияют на дисперсионную кривую спиновой волны?
- Спинволновая спектроскопия.
 - Схема измерений.
 - Определение магнитных и электрических характеристик магнитных наноструктур.

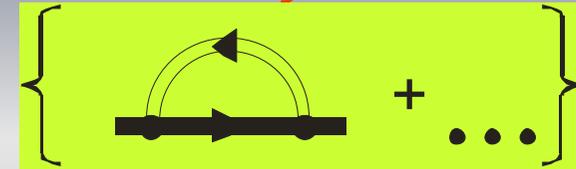
Уравнения, описывающие СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ

Спиновая система

$$H = -g\mu_B \sum H_\nu S^\nu - \frac{1}{2} \sum J_{\mu\nu} S^\mu S^\nu$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \gamma [(H^{(eff)} + h) \times M] +$$

Затухание



Поле

$$\text{rot } e = -\frac{\partial b}{c \partial t}$$

$$\text{div } b = 0$$

$$\text{div } \epsilon e = 0$$

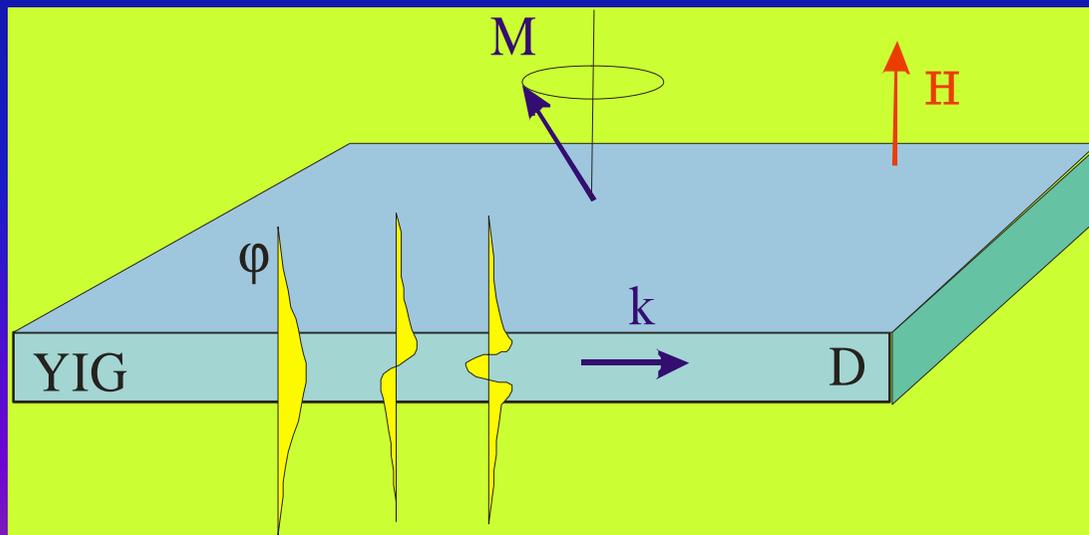
$$\text{rot } h = \frac{4\pi\sigma e}{c} + \frac{\partial \epsilon e}{c \partial t}$$

Если пренебрегаем электрическим полем e (это можно сделать, если нет проводящих структур), то спиновая волна называется магнитостатической.

$$h = -\nabla \varphi$$

Типы магнитостатических волн

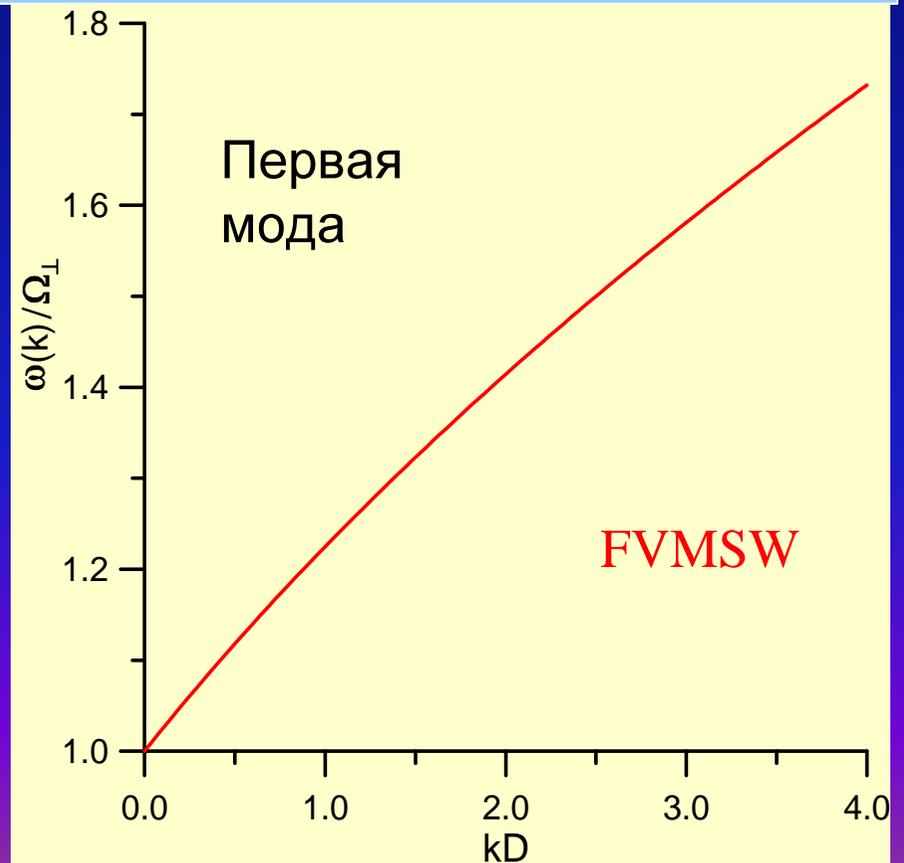
ПОМСВ – прямые
объёмные
магнитостатические
волны



$$\omega^2 = \Omega_{\perp} (\Omega_{\perp} + \Omega_m kD / 2)$$

$$\Omega_m = \gamma \cdot 4\pi M$$

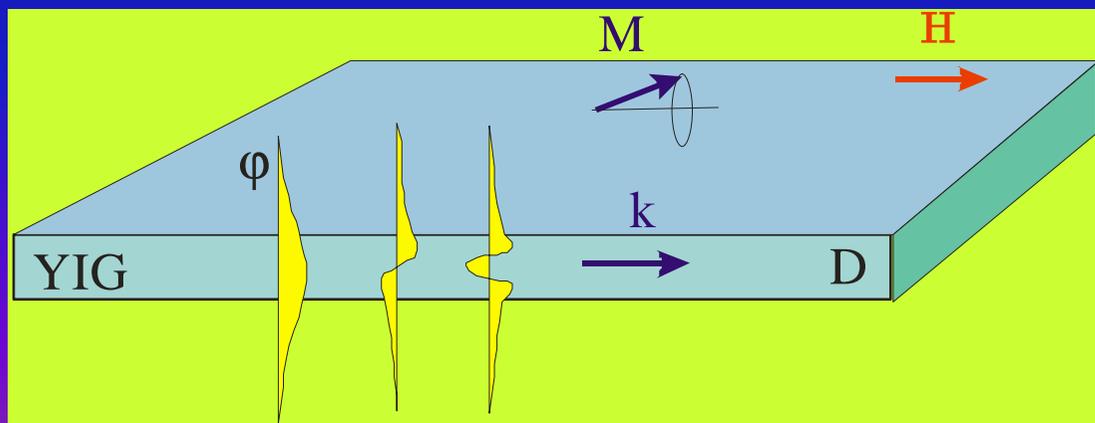
$$\Omega_{\perp} = \gamma H - \Omega_m$$



ООМСВ – обратные
объёмные
магнитостатические
волны

$$\omega^2 = \Omega_{\parallel}^2 - \frac{\gamma H \Omega_m k D}{2(1 + kD)}$$

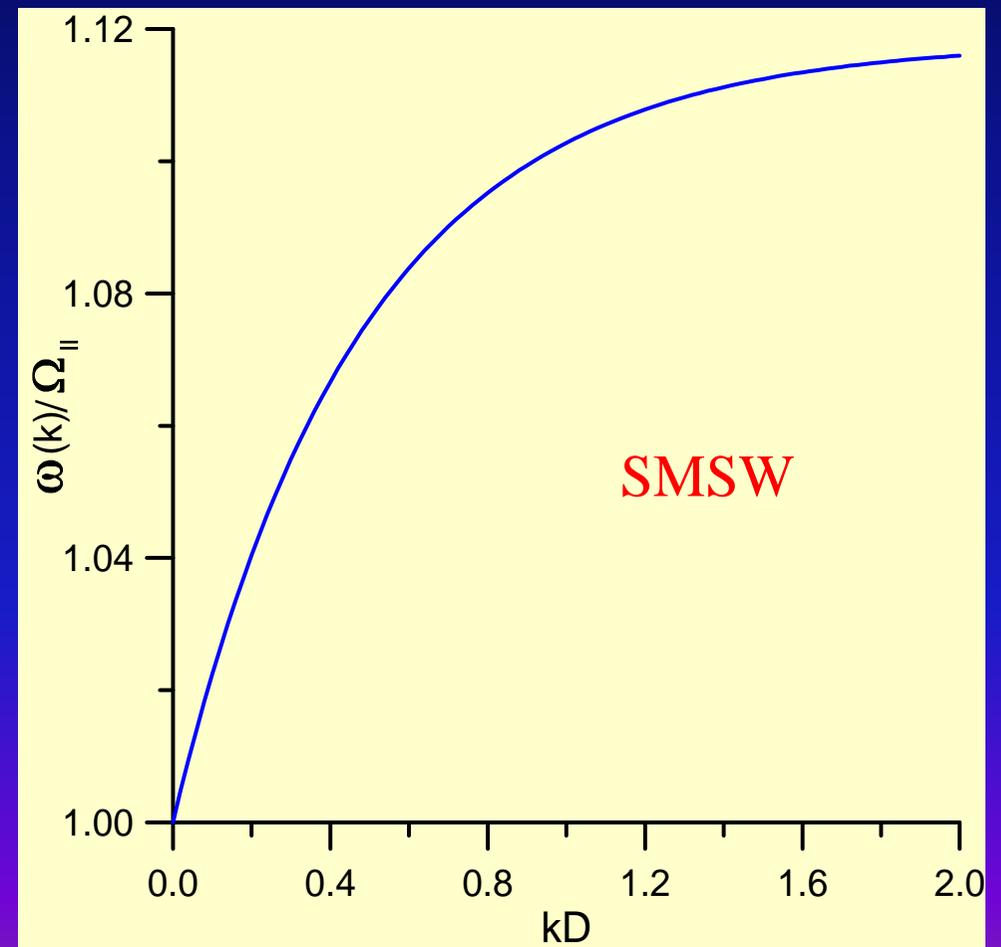
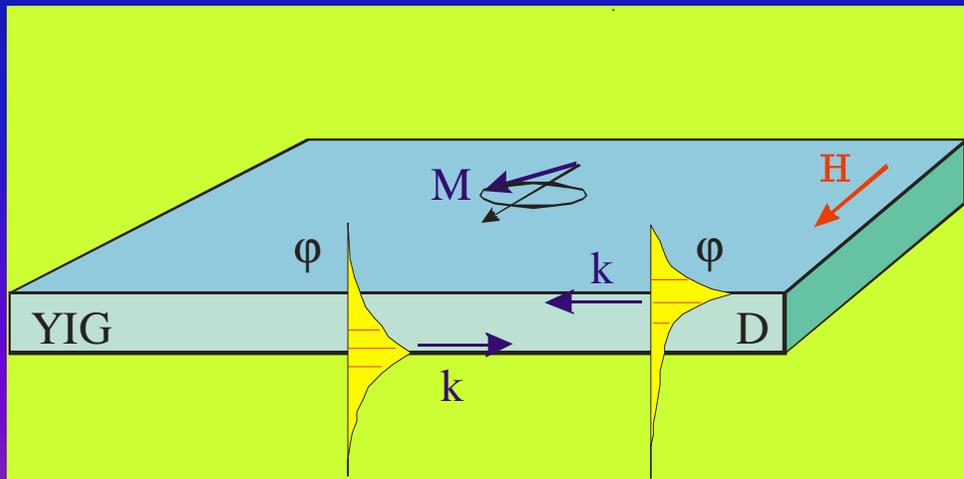
$$\Omega_{\parallel}^2 = \gamma H (\gamma H + \Omega_m)$$



$$\omega^2 = \Omega_{\parallel}^2 + \Omega_m^2 [1 - \exp(-2kD)] / 4$$

ПМСВ – поверхностные магнитостатические волны

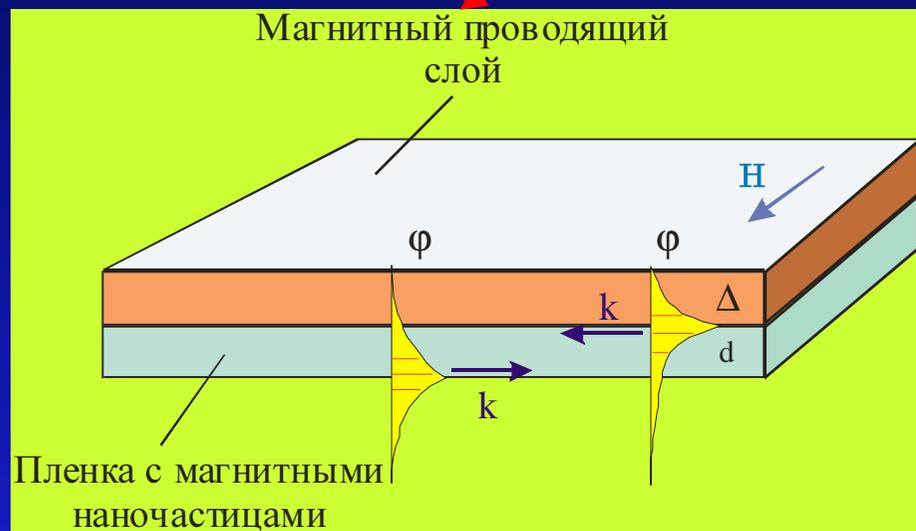
$$V_{gr} = \frac{\partial \omega(k)}{\partial k}$$



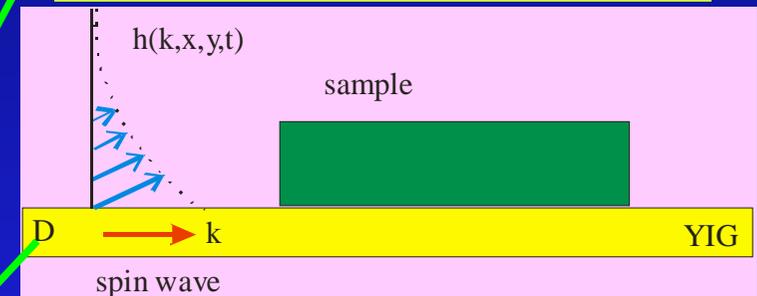
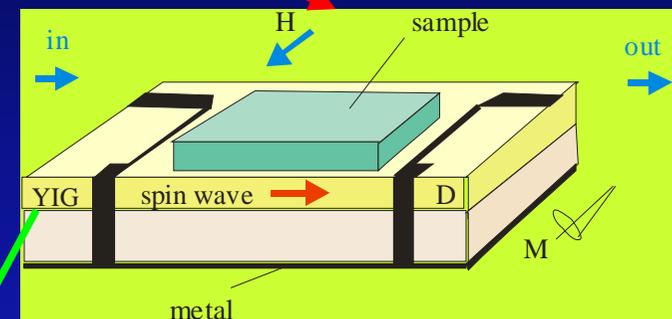
Что будем исследовать?

Дисперсионные кривые и изменения групповых скоростей
поверхностных спиновых волн в структурах

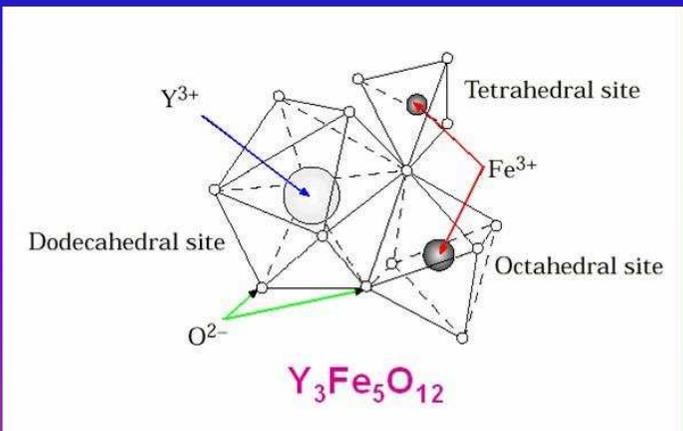
Спиновая волна в образце



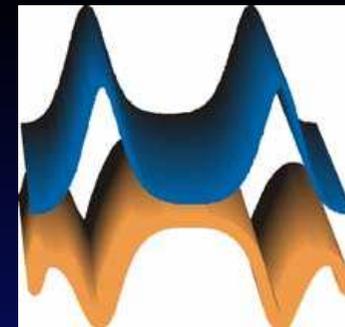
Спиновая волна в YIG



Yttrium iron garnet $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) is a ferrimagnetic material which is widely used in various microwave and optical-communication devices and other applications - mainly due to its suitable magnetic and magneto-optical properties. (Wikipedia)



Какие факторы влияют на дисперсионную кривую поверхностной спиновой волны?



Проводимость пленки, в которой распространяется спиновая волна



Проводимость слоя



Величина намагниченности и ее неоднородность по толщине пленки



Магнитные параметры слоя (намагниченность, магнитные потери)



Неколлинеарность спинов в пленке



Влияние проводимости пленки, в которой распространяется спиновая волна

$$4\pi M = 5 \text{ kOe},$$

$$d = 400 \text{ nm},$$

$$H = 3 \text{ kOe}$$

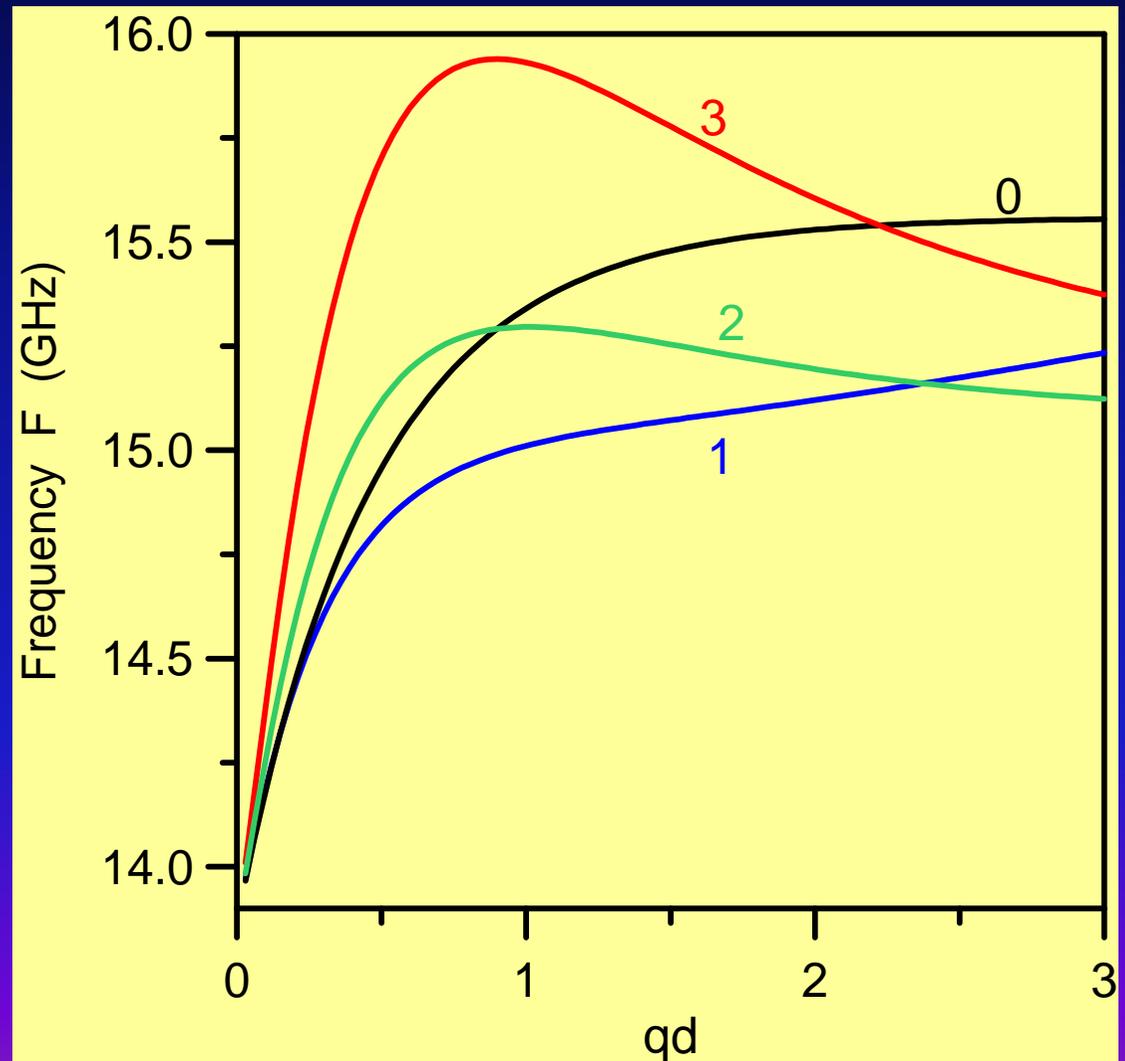
Проводимость σ :

$$(0) - 0,$$

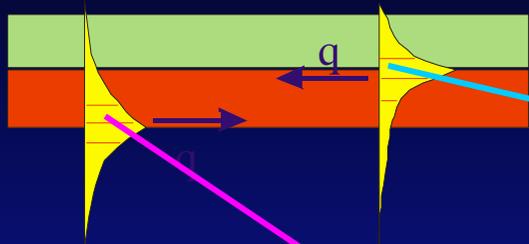
$$(1) - 2 \cdot 10^4,$$

$$(2) - 2 \cdot 10^5,$$

$$(3) - 1 \cdot 10^6 \text{ } (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$



Влияние проводимости слоя на дисперсионную кривую спиновой волны



$$4\pi M = 5 \text{ kOe},$$

$$d = 400 \text{ nm},$$

$$H = 3 \text{ kOe}.$$

Проводимость слоя

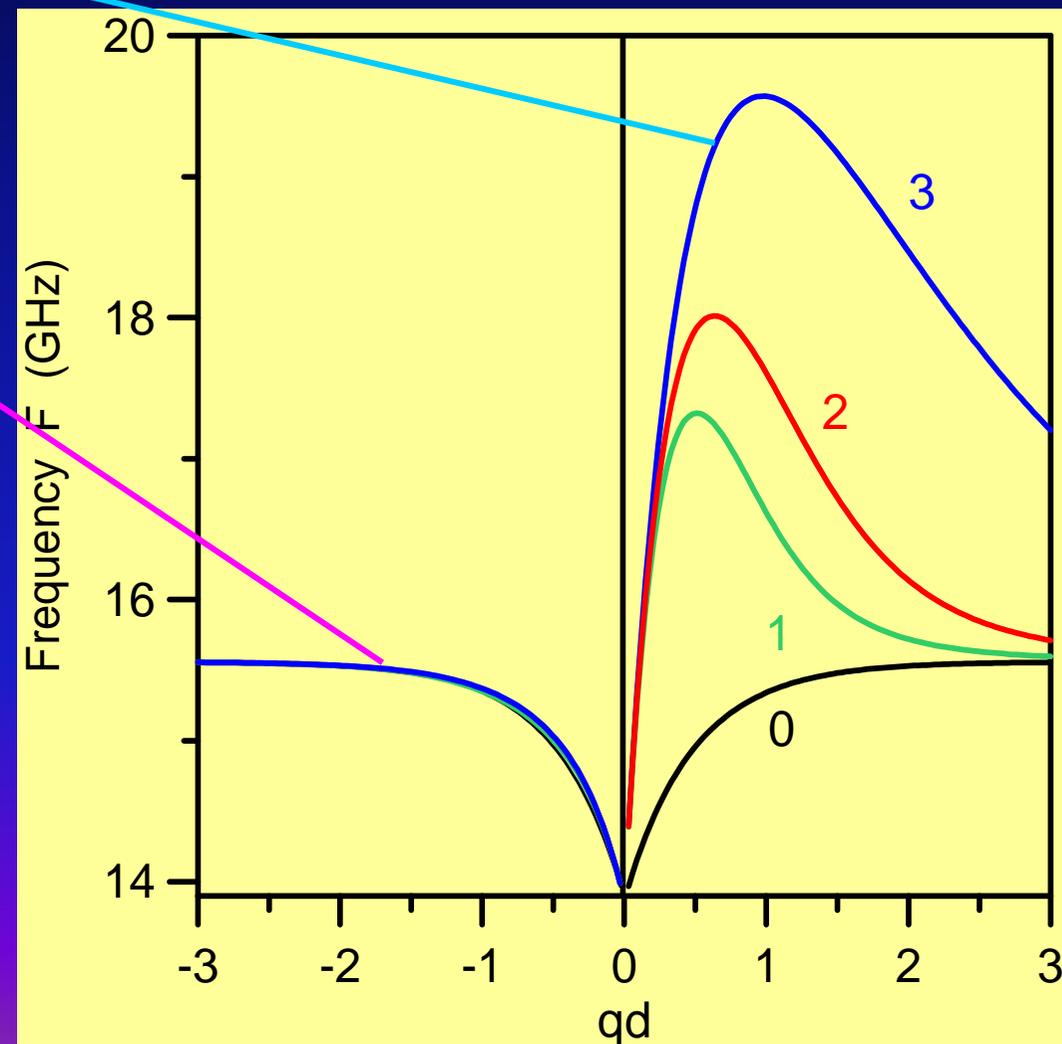
10 μm :

(0) - 0,

(1) - $1 \cdot 10^4$,

(2) - $2 \cdot 10^4$,

(3) - $1 \cdot 10^5 \text{ (}\Omega \cdot \text{cm)}^{-1}$



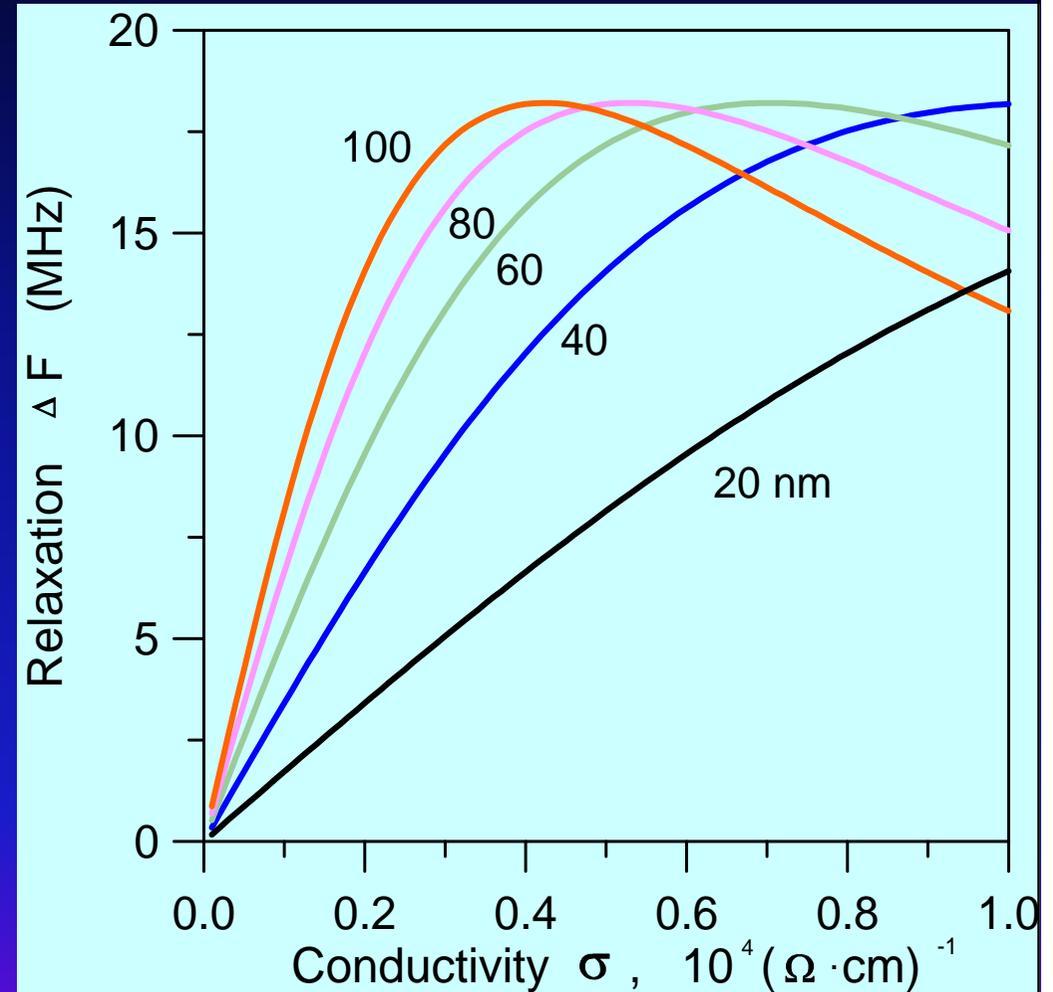
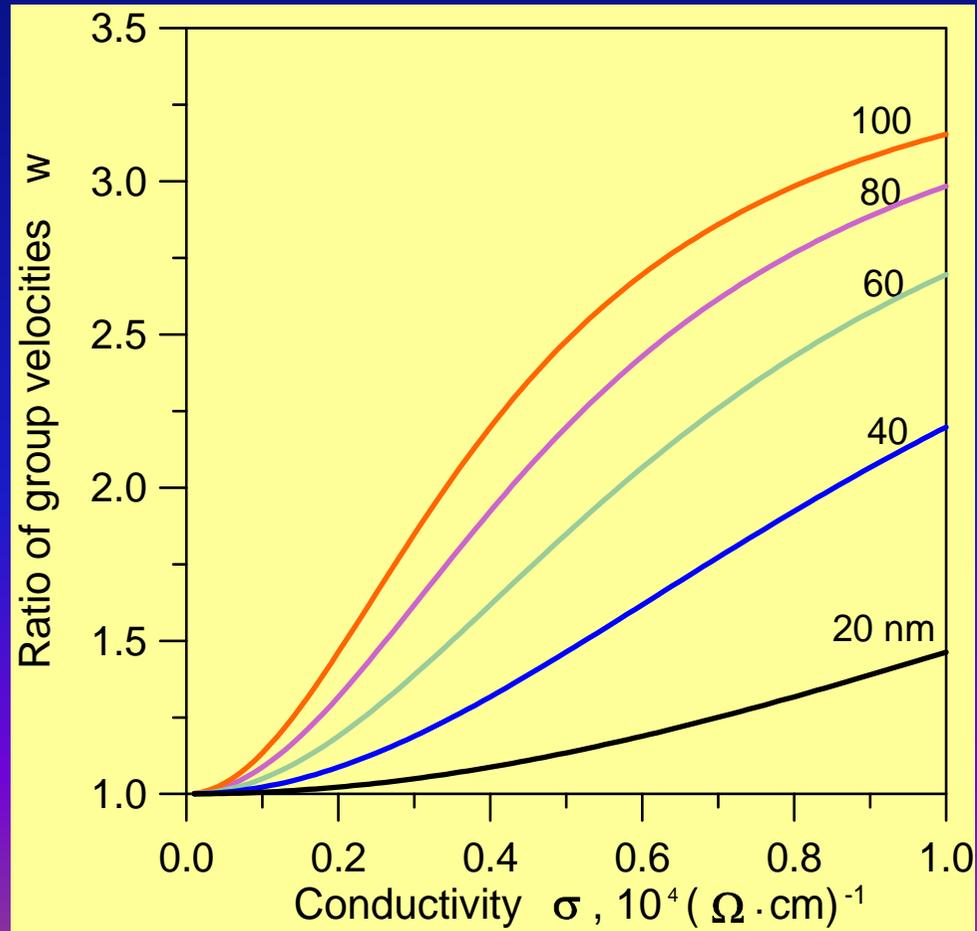
Влияние проводимости слоя на групповую скорость и затухание

$$4\pi M = 1750 \text{ Oe},$$

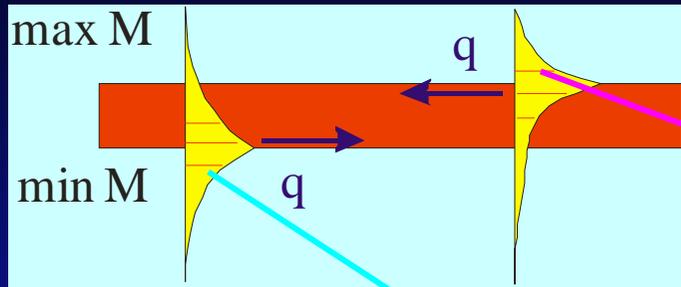
$$d = 14 \mu\text{m},$$

$$H = 410 \text{ Oe}.$$

$$q \rightarrow 0$$



Влияние неоднородности намагниченности по толщине пленки



$$4\pi M(z) = 5 \text{ kOe} - \xi z,$$

$$d = 400 \text{ nm},$$

$$H = 3 \text{ kOe}$$

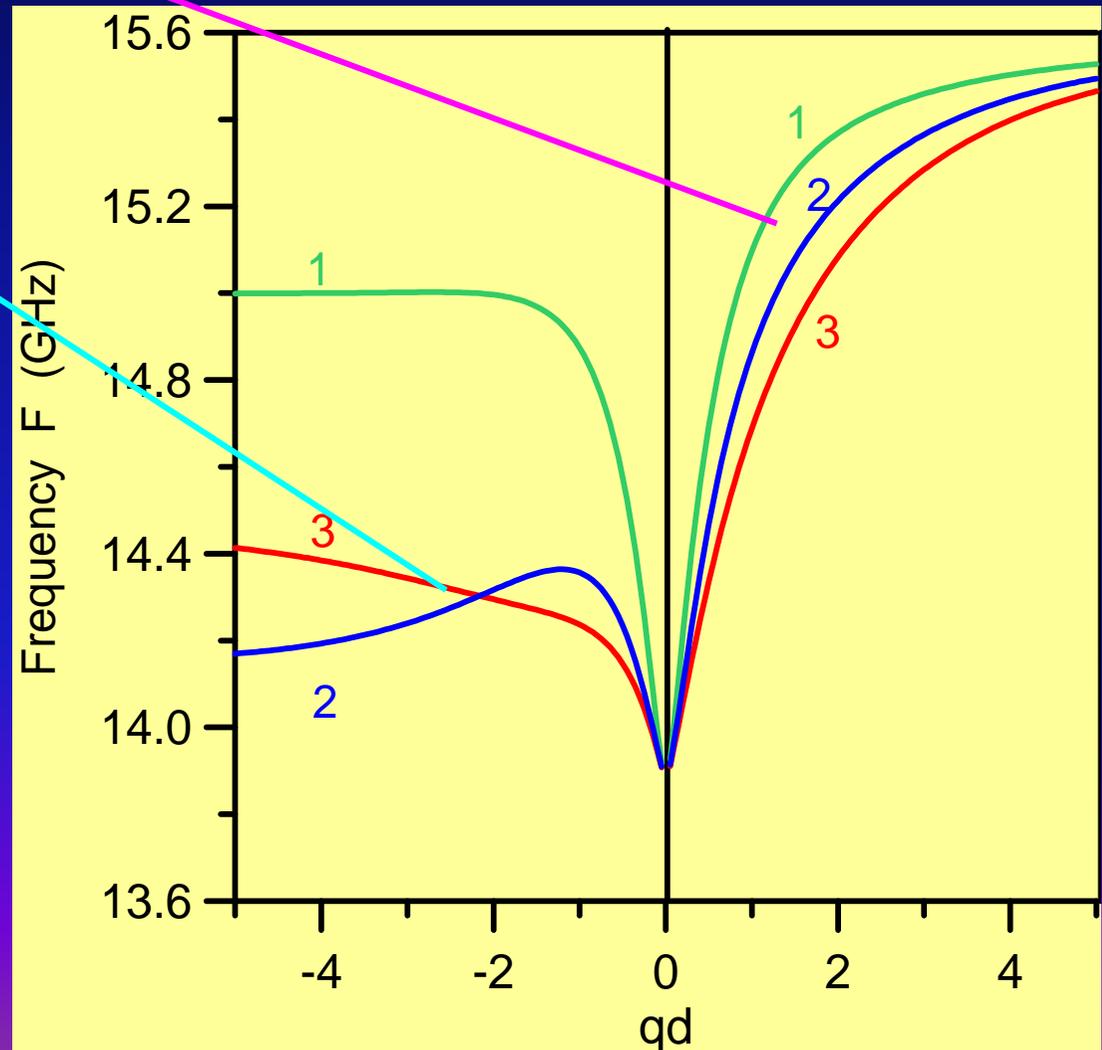
Градиент

намагниченности ξ :

(1) - 1,

(2) - 2.5,

(3) - 5 kOe/ μm .



Влияние параметра релаксации слоя $\delta\omega/\omega$ на групповую скорость спиновой волны

$$4\pi M = 1750 \text{ Oe},$$

$$d = 14 \mu\text{m},$$

$$H = 410 \text{ Oe}.$$

$$q \rightarrow 0$$

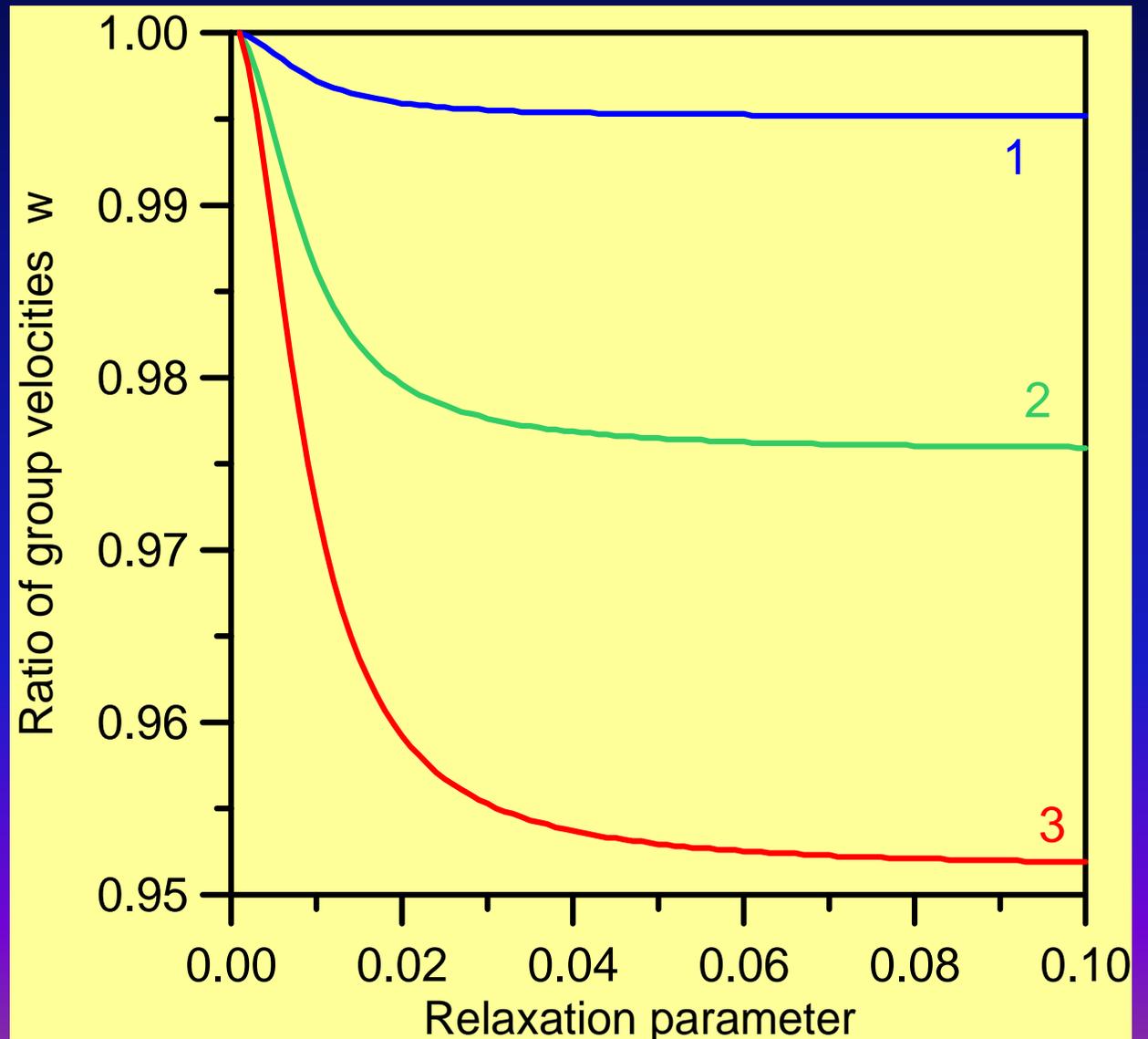
Слой:

$$4\pi M = 1700 \text{ Oe},$$

$$(1) - 0.1,$$

$$(2) - 0.5,$$

$$(3) - 1 \mu\text{m}.$$



Влияние неколлинеарности спинов на дисперсионную кривую спиновой волны

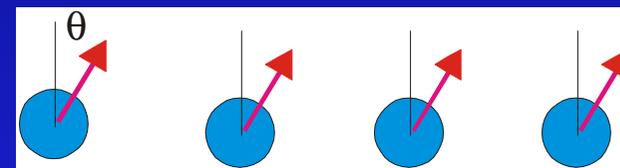
Параметры порядка:

$$\xi = \frac{1}{2} \int_0^\pi f(\theta)(1 + \cos^2 \theta) \sin \theta d\theta$$

$$\zeta = \int_0^\pi f(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta$$

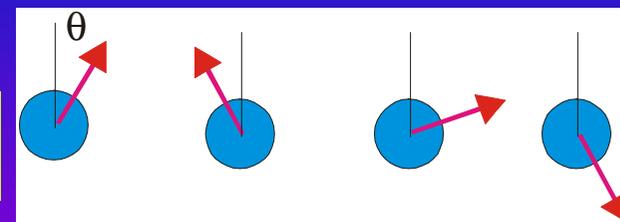
Ферромагнетик

$$\xi = \zeta = 1$$



Суперпарамагнетик

$$\xi = 2/3, \quad \zeta = 0$$



Поверхностная
спиновая мода

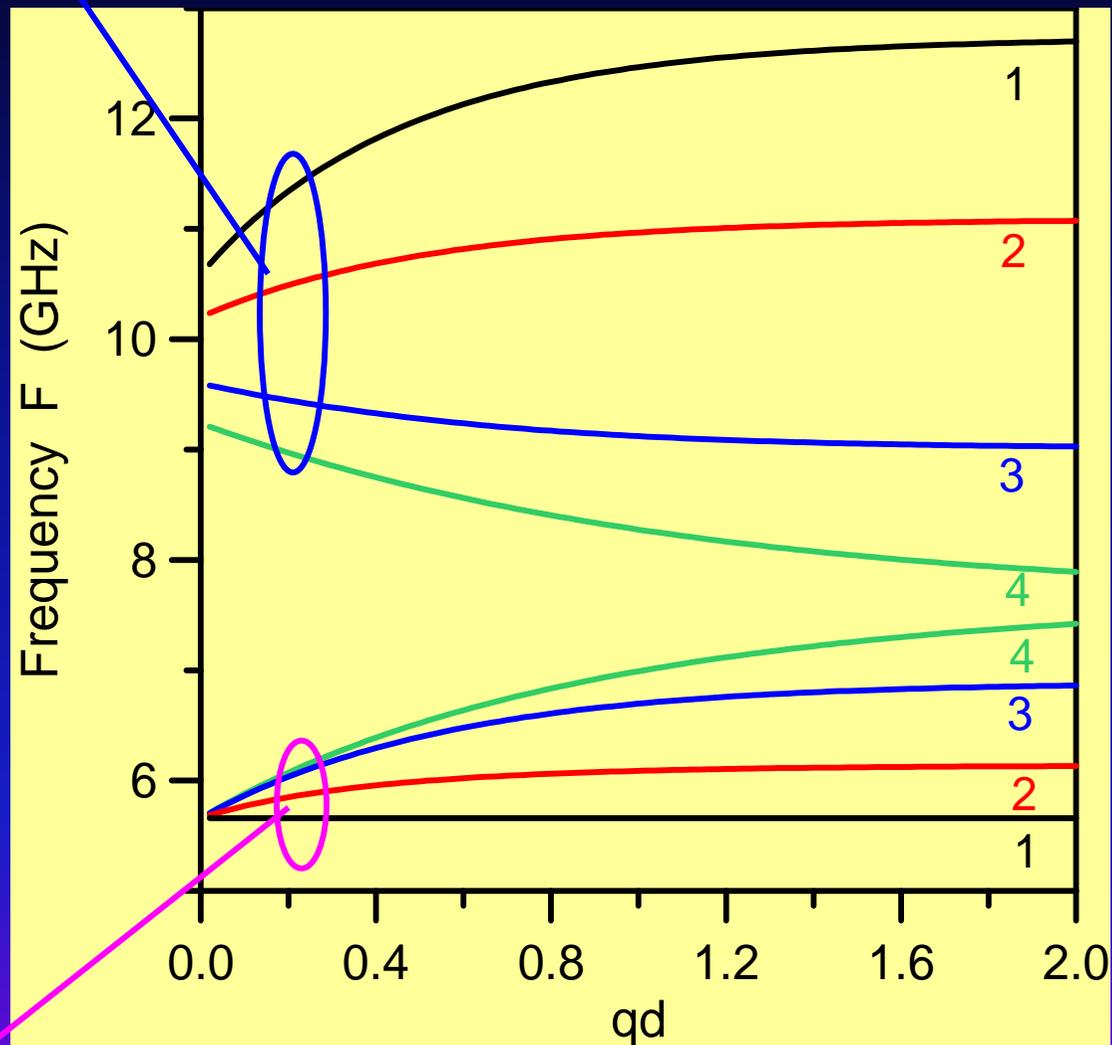
$4\pi M = 5$ kOe,
 $d = 400$ nm,
 $H = 2$ kOe.

(1) - $\xi = 1, \zeta = 1,$

(2) - 0.9, 0.7,

(3) - 0.75, 0.3,

(4) - 2/3, 0.



Продольная
спиновая мода

Спинволновая спектроскопия

Проводимость, неоднородность магнитных параметров, неколлинеарность спинов по разному изменяют дисперсионную кривую спиновых волн



Возможно решение обратной задачи: определение параметров структуры по дисперсионной кривой

Общая схема решения обратной задачи

$$4\pi M(z) = \sum_n \frac{\mu_n}{n!} z^n$$

$$\sigma(z) = \sum_n \frac{\sigma_n}{n!} z^n$$

$$\xi(z) = \sum_n \frac{\xi_n}{n!} z^n$$

$$\zeta(z) = \sum_n \frac{\zeta_n}{n!} z^n$$

Ограничение членов ряда

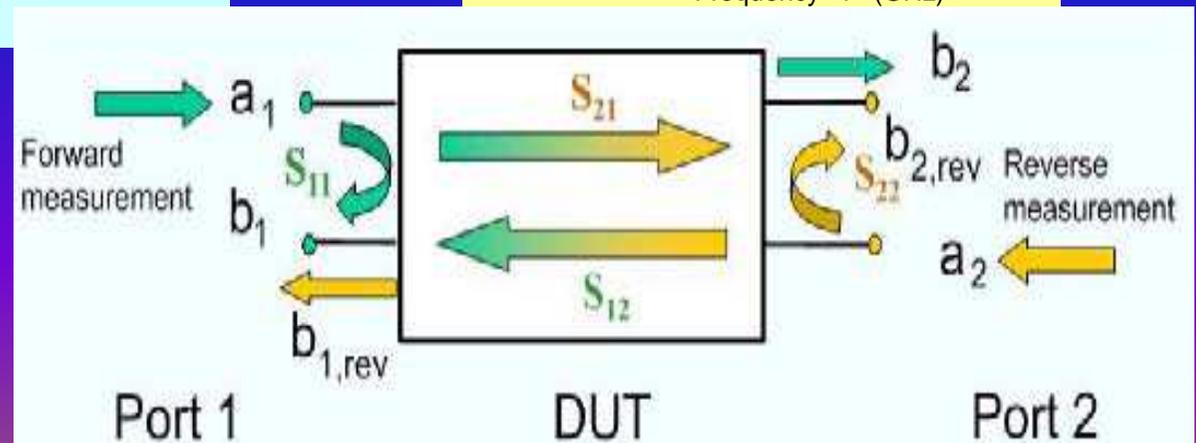
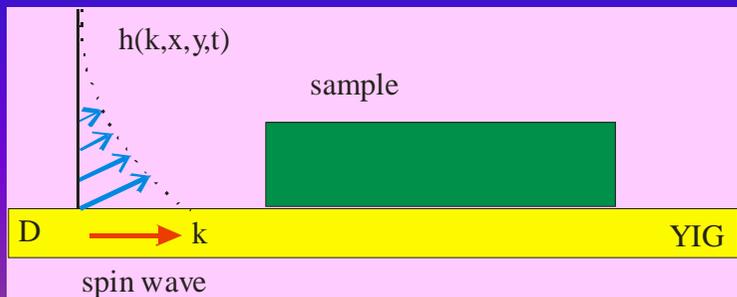
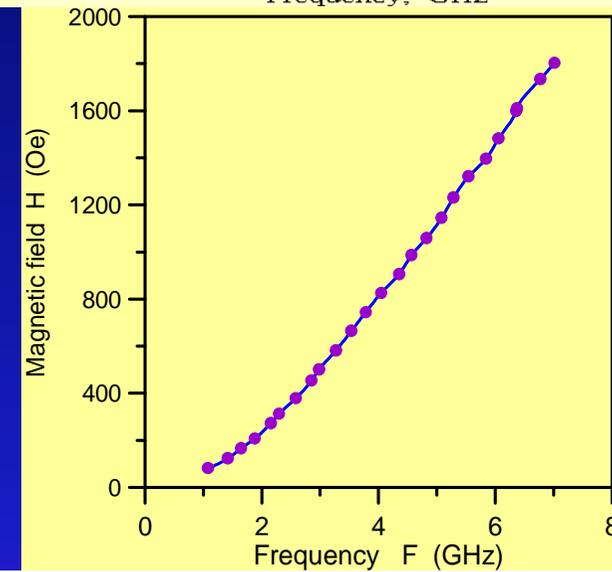
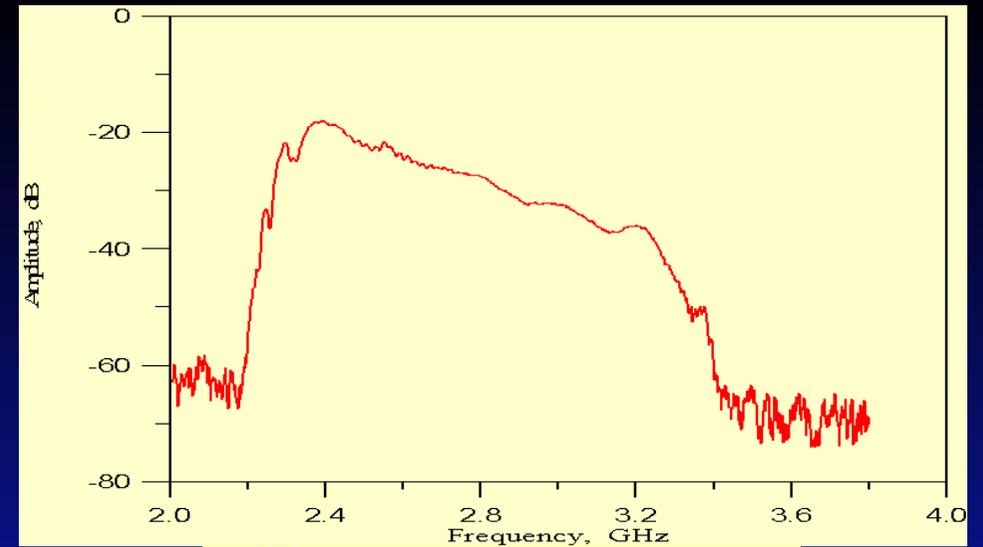
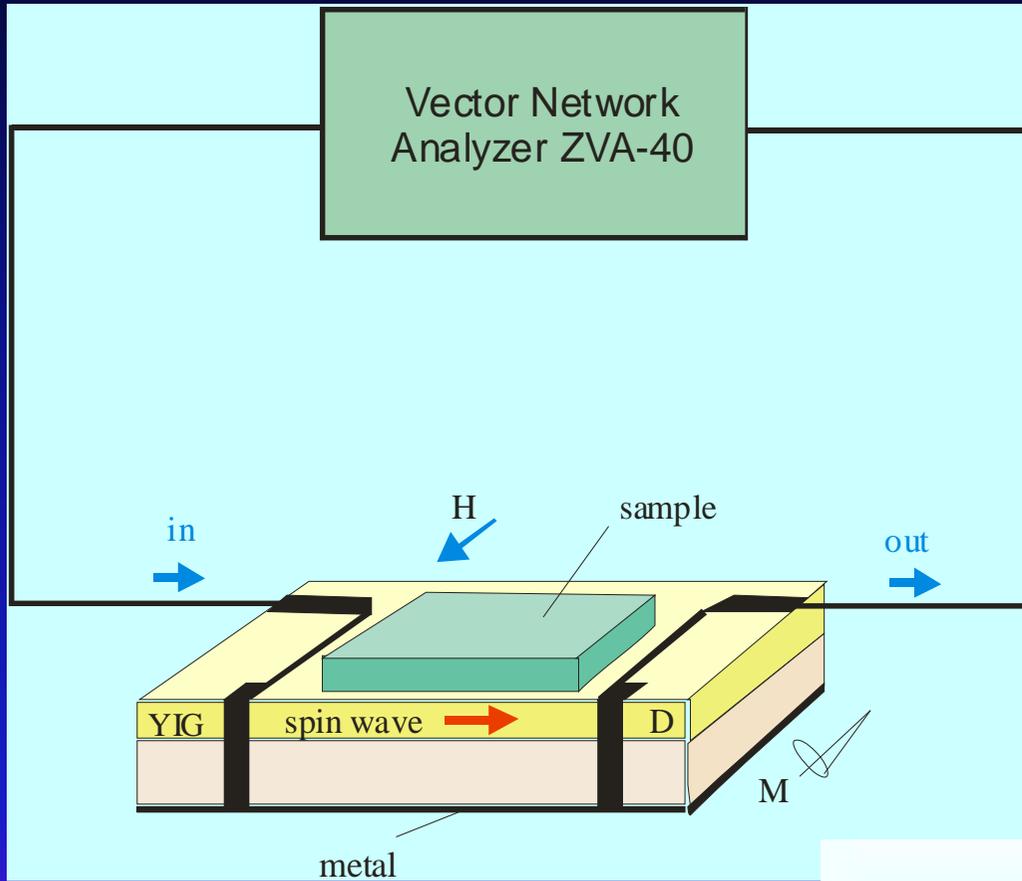
$$n_{\max} = q^{(\max)} d / 2\pi$$



Определение минимума функционала

$$S[\{p\}] = \sum_j^N [\omega^{(\text{exp})}(q_j) - \omega^{(\text{teor})}(q_j, \{p\})]^2$$

Схема измерений



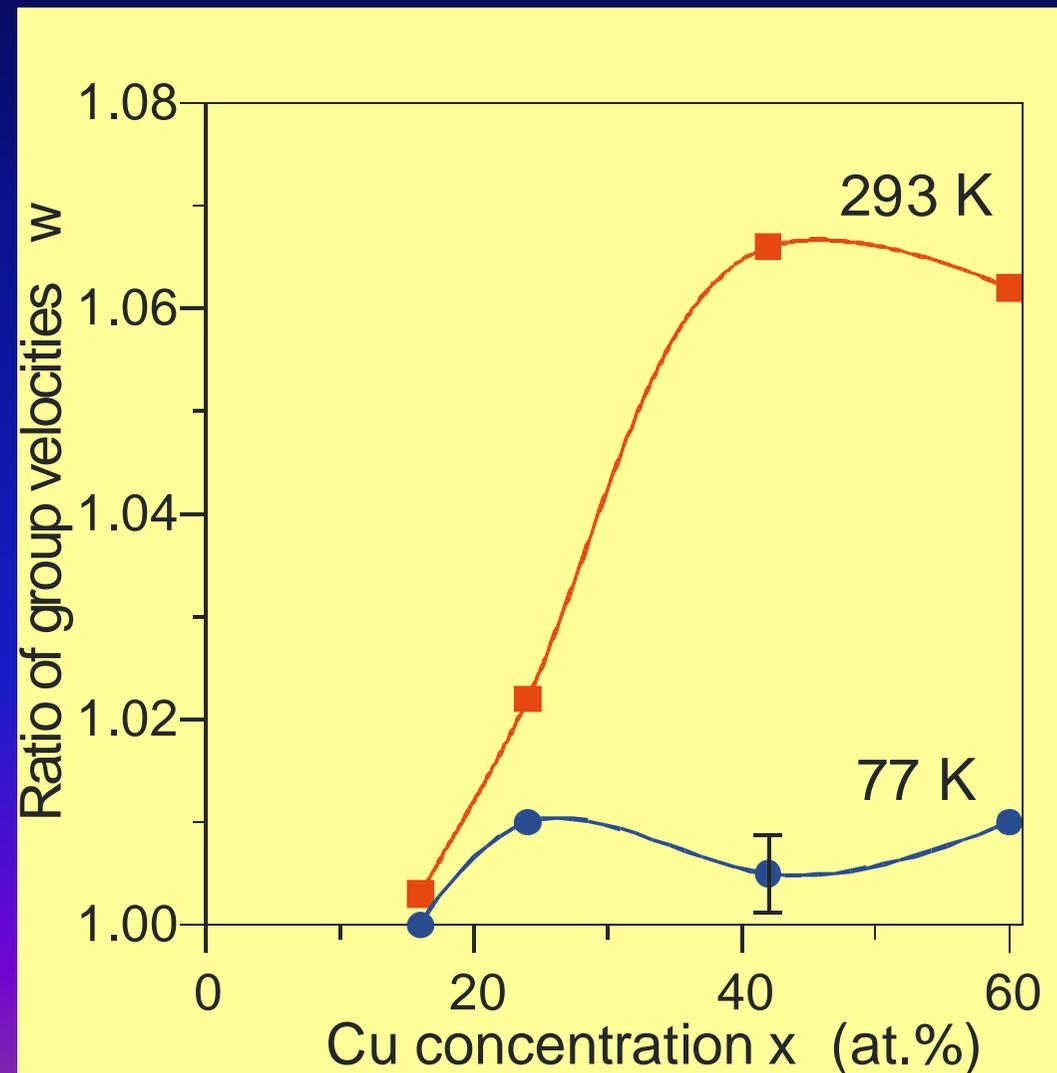
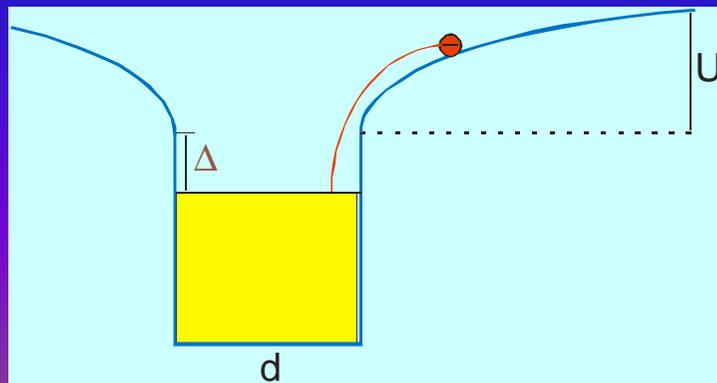
Влияние проводимости и магнитных свойств образца на групповую скорость и затухание спиновой волны

Изменение w групповой скорости спиновой волны в YIG пленке со слоем $(a\text{-C:H})_{100-x}\text{Cu}_x$ к групповой скорости без слоя $(a\text{-C:H})_{100-x}\text{Cu}_x$

Cu: 2 – 3 nm

$d = 50$ nm

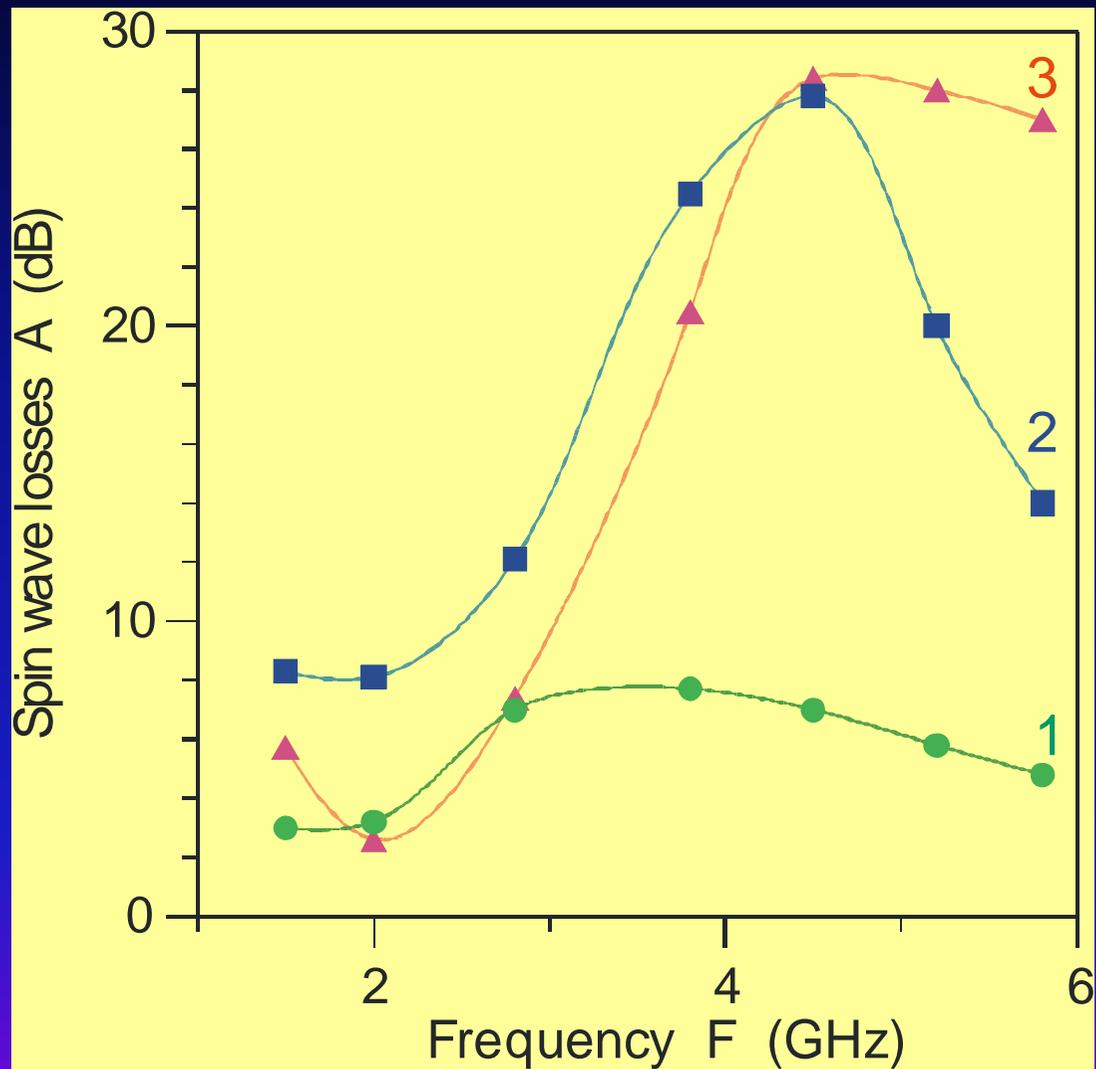
$F = 4$ GHz



Зависимость затухания
А спиновой волны,
распространяющейся в
пленке YIG с
пленкой SiO₂
с наночастицами Co.

Co: 3 – 5 nm
d = 600 nm

Концентрации Co:
1 -- 22.5,
2 -- 36.0
3 -- 54.2 at.%.



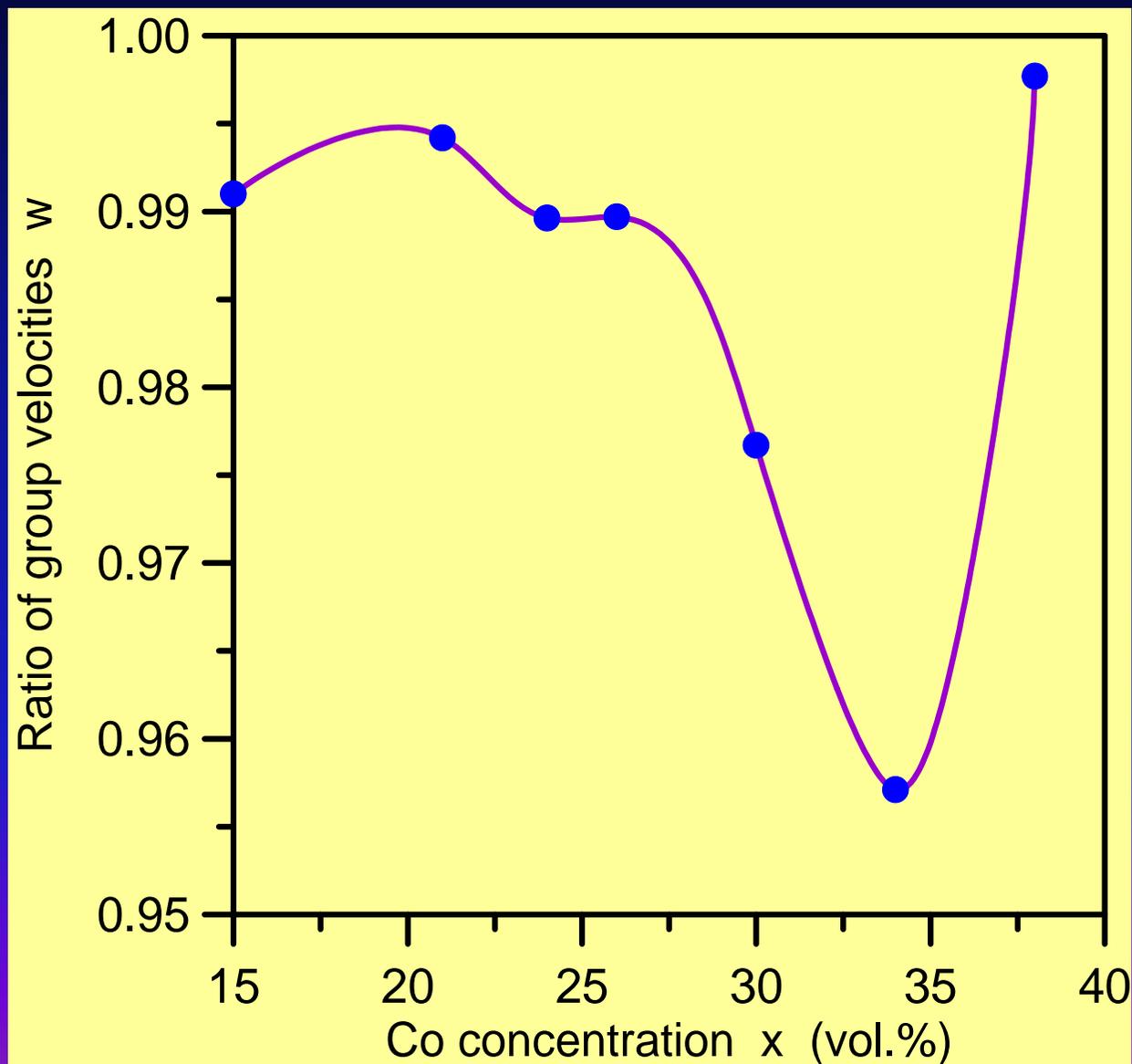
Изменение w групповой скорости спиновой волны в YIG пленке, взаимодействующей с образцами ZnO(Co).

ZnO: 49 nm

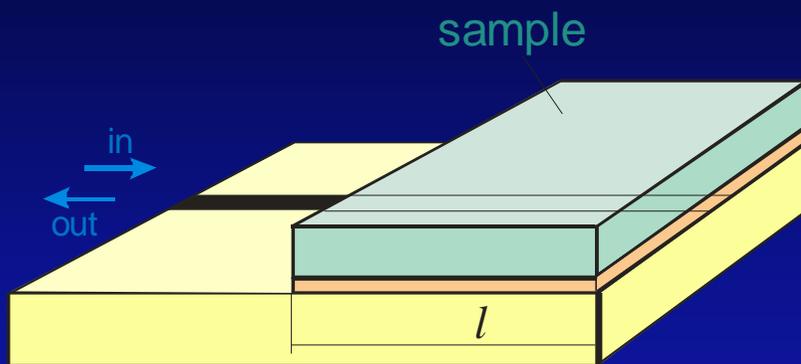
Co: 21 nm

$F = 2.3$ GHz

$5 \times 5 \times 1.8$ mm



Спектры поглощения электромагнитной волны на микрополосковой линии



BaTiO_3 с наночастицами Ni

$4 \times 3 \times 1$ mm

BaTiO₃: 30 nm

Ni: 20 nm

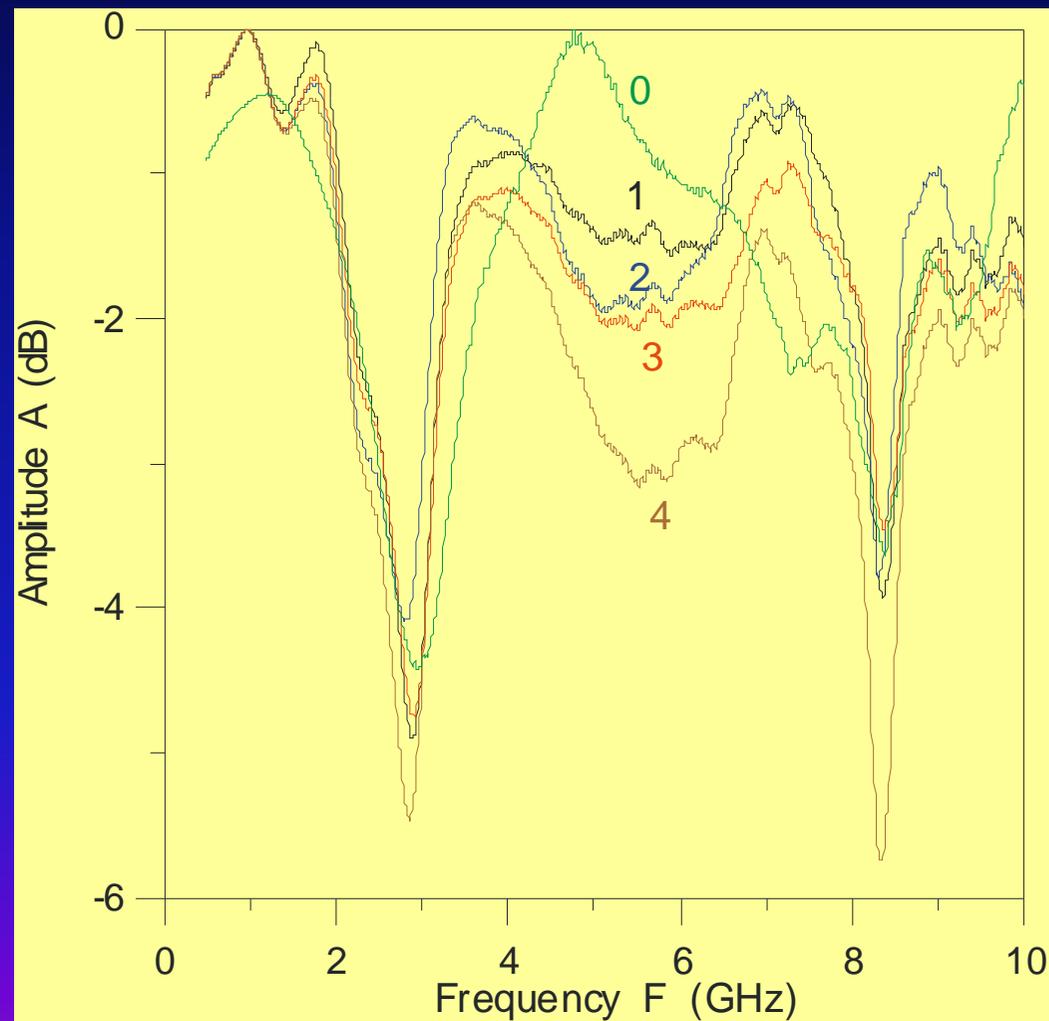
Ni: 0 -- 0,

1 -- 0.93,

2 -- 2.17,

3 -- 4.07,

4 -- 8.01 vol. %.



Изменение групповой скорости w спиновой волны в YIG пленке, взаимодействующей с образцами

BaTiO₃ с наночастицами Ni

4 × 3 × 1 mm

BaTiO₃: 30 nm

Ni: 20 nm

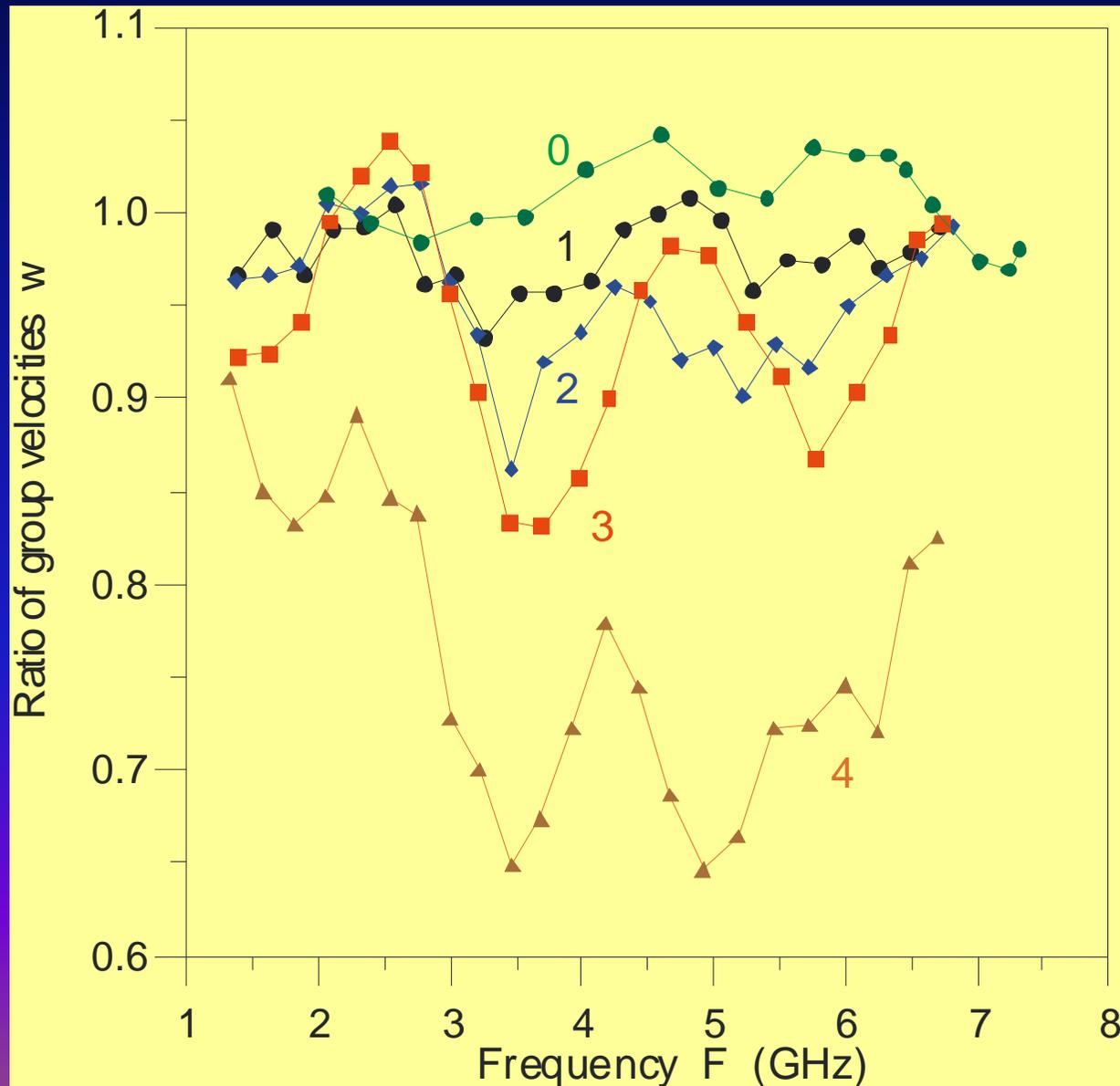
Ni: 0 -- 0,

1 -- 0.93,

2 -- 2.17,

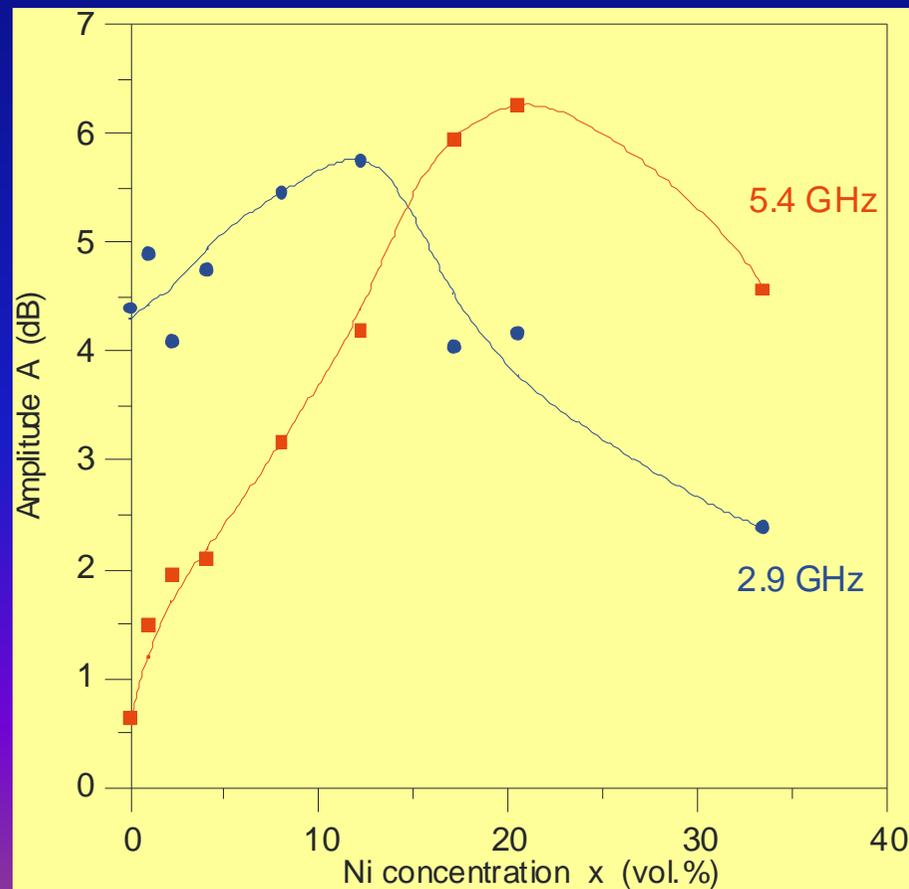
3 -- 4.07,

4 -- 8.01 vol. %.

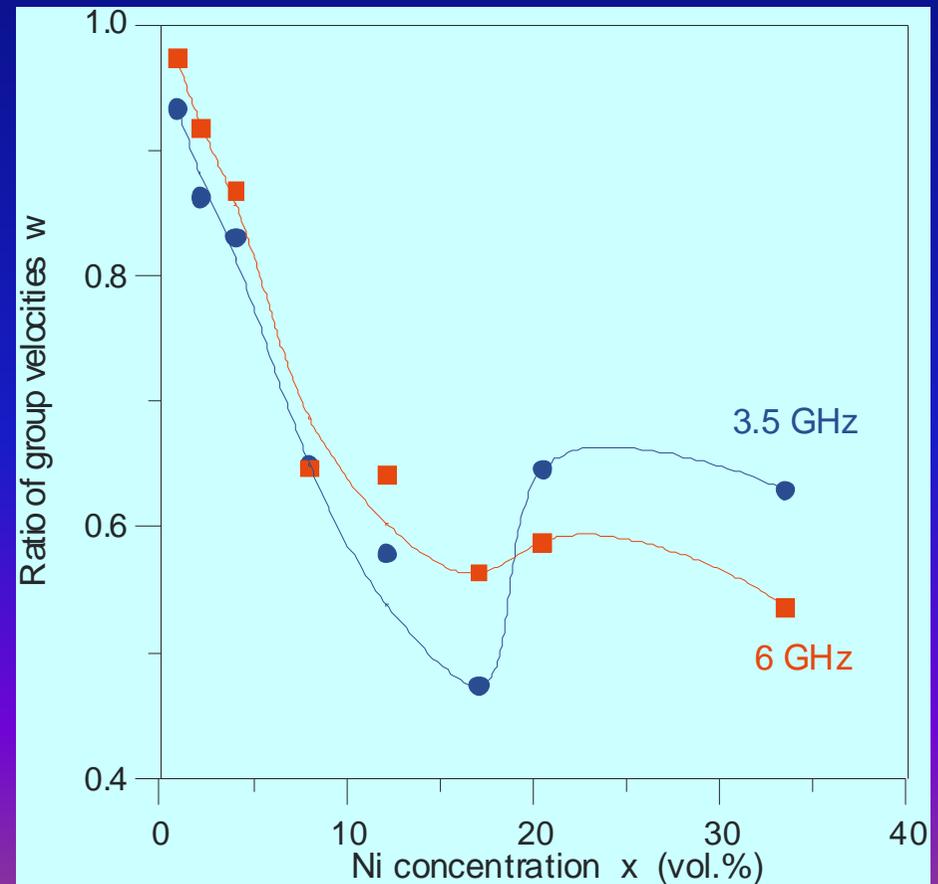


Сравнение двух методов

Амплитуды пиков поглощения
электромагнитной волны на
микрополосковой линии для
образцов $\text{BaTiO}_3(\text{Ni})$



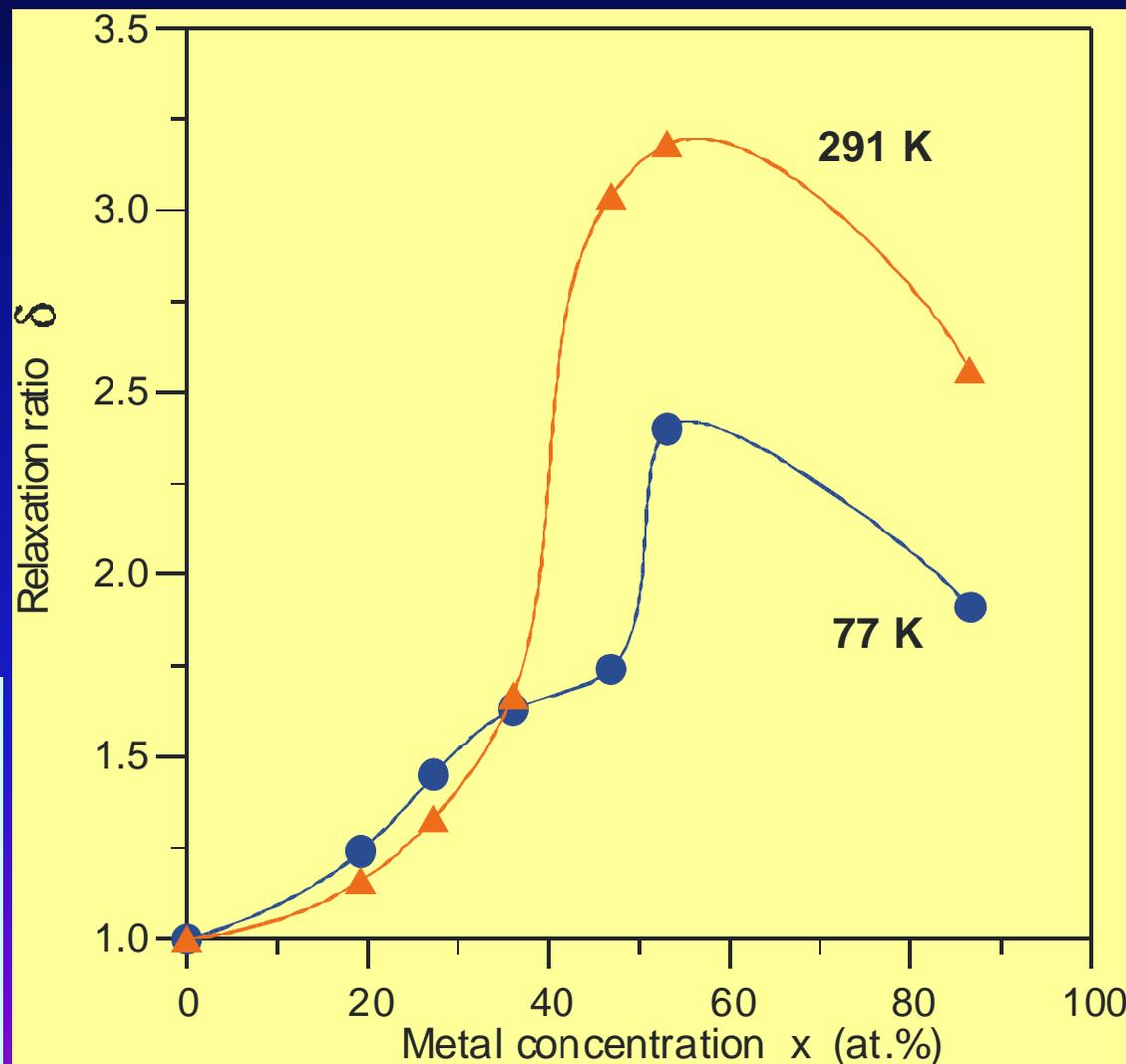
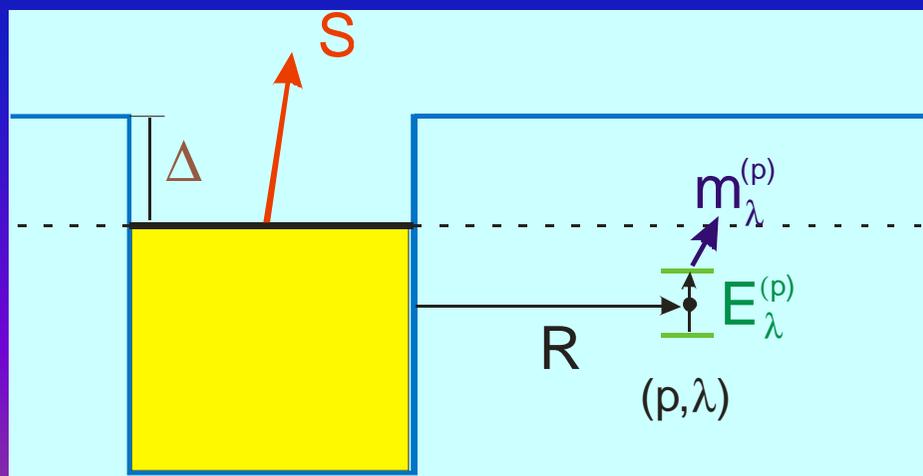
Изменение групповой скорости
 w спиновой волны в YIG
пленке, взаимодействующей с
образцами $\text{BaTiO}_3(\text{Ni})$



Температурные зависимости спин-поляризационной релаксации

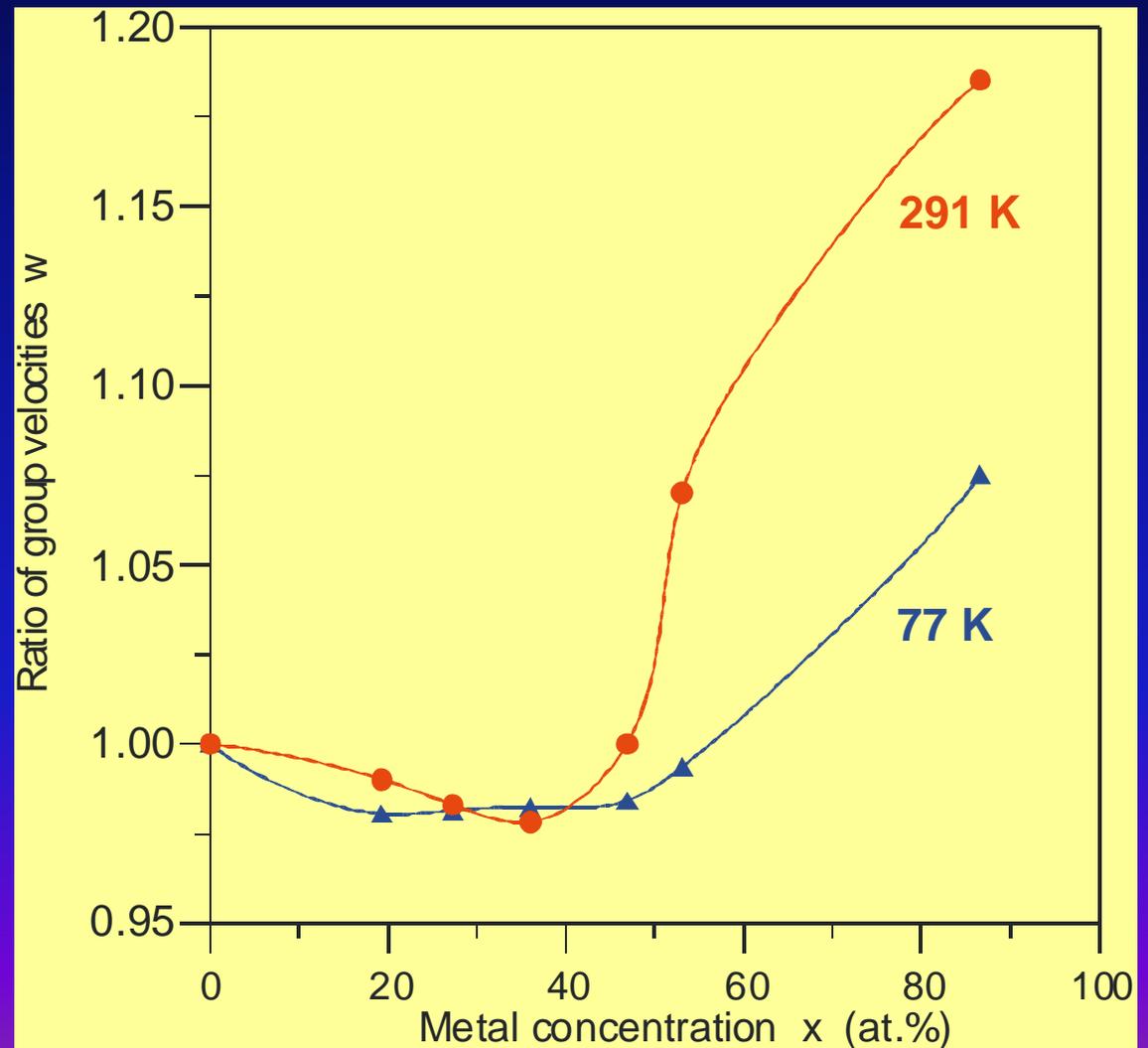
Относительное изменение параметра релаксации δ спиновой волны в пленке YIG, вносимое взаимодействием с пленками SiO₂ с гранулами Co₈₆Nb₁₂Ta₂.

$d = 2.7 - 5.1 \mu\text{m}$
 $F = 2.2 - 4.0 \text{ GHz}$



Изменение w групповой скорости спиновой волны в пленке YIG, вносимое взаимодействием с пленками SiO_2 с гранулами $\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2$.

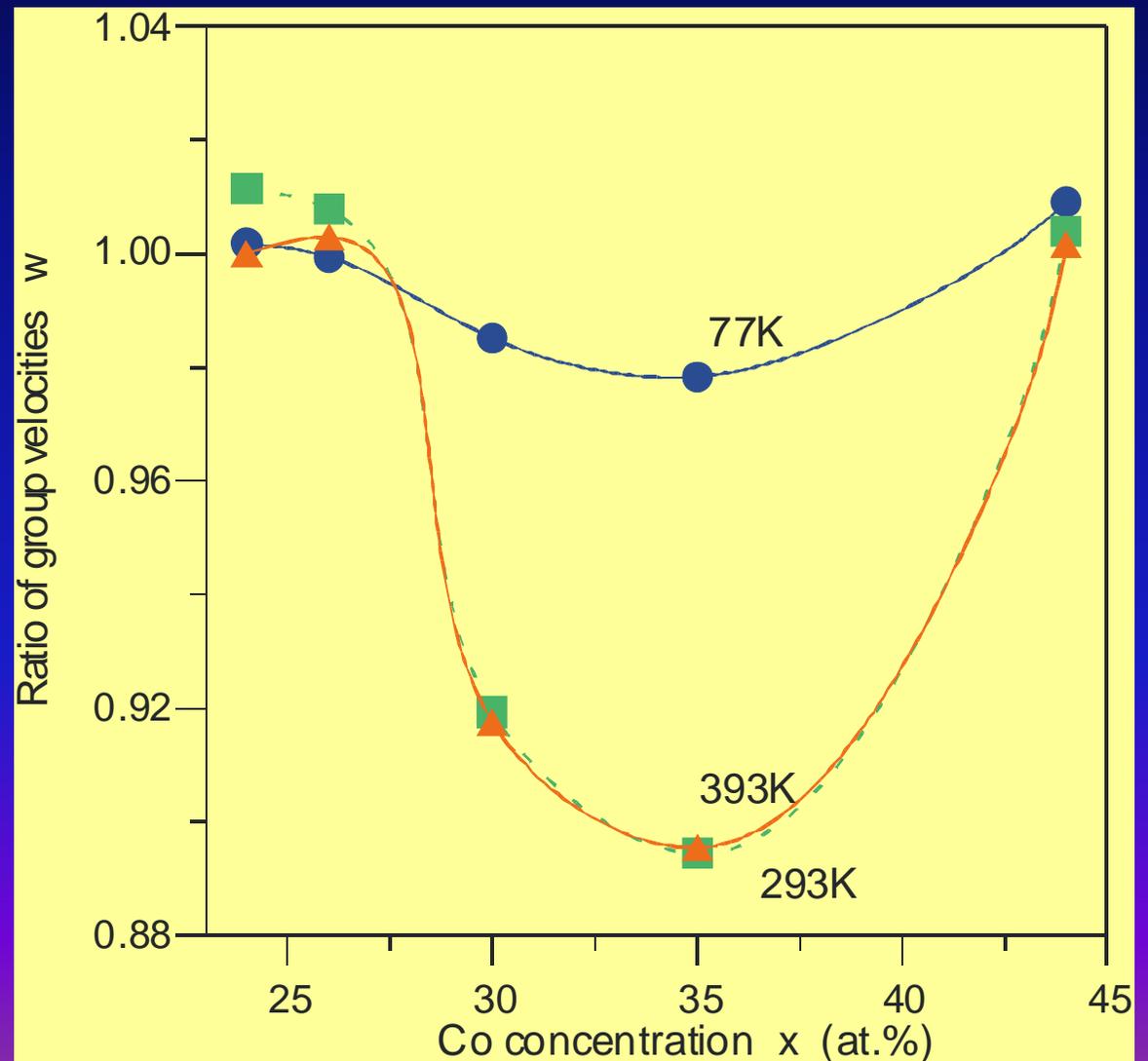
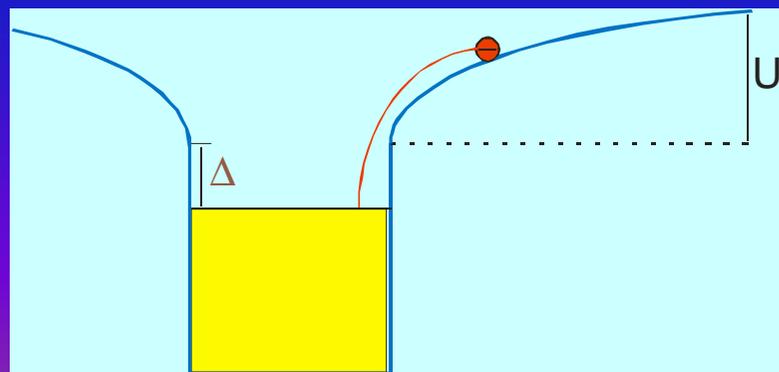
$d = 2.7 - 5.1 \mu\text{m}$
 $F = 2.2 - 4.0 \text{ GHz}$



Изменение w групповой скорости спиновой волны в YIG пленке, взаимодействующей с образцами $(\alpha\text{-C:H})_{100-x}\text{Co}_x$

$d = 250 - 550 \text{ nm}$

$F = 2.2 - 4.0 \text{ GHz}$



Определение параметров гетероструктур $\text{SiO}_2(\text{Co}) / \text{GaAs}$

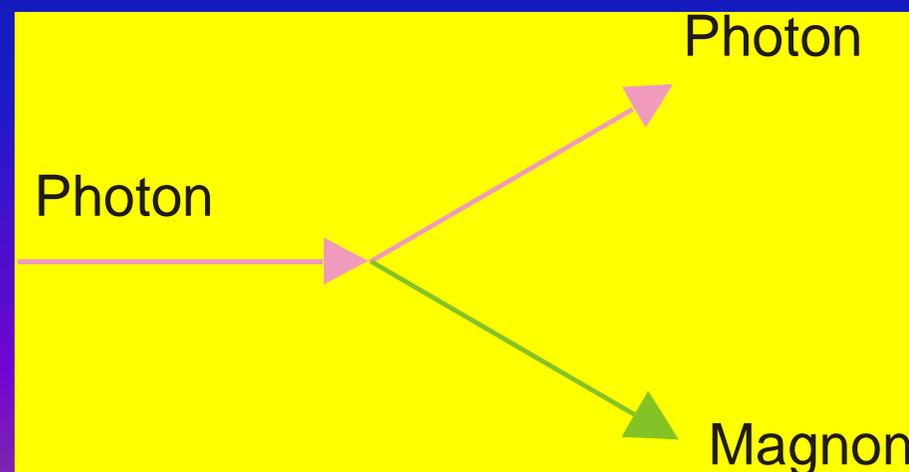
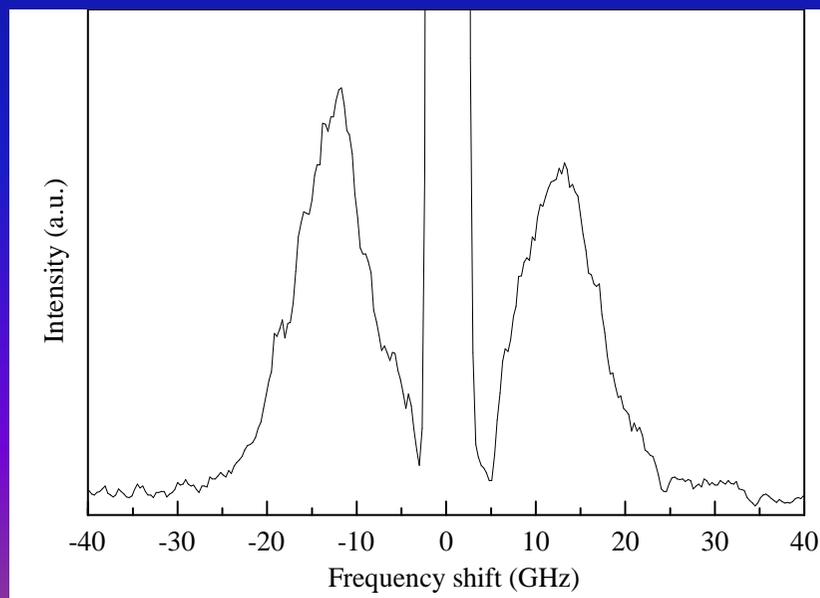
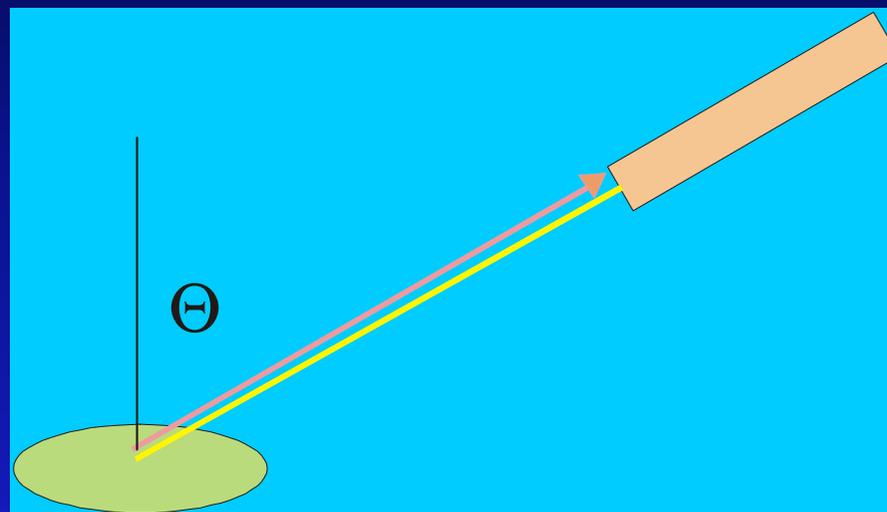
Ar⁺ laser, 350 mW

$\lambda = 514 \text{ nm}$

Волновой вектор
возбуждаемой спиновой
волны

$$q = (4\pi/\lambda) \sin \theta$$

Brillouin Light Scattering
technique



Spin wave frequency vs angle of incidence.

$$q = (4\pi/\lambda) \sin \theta$$

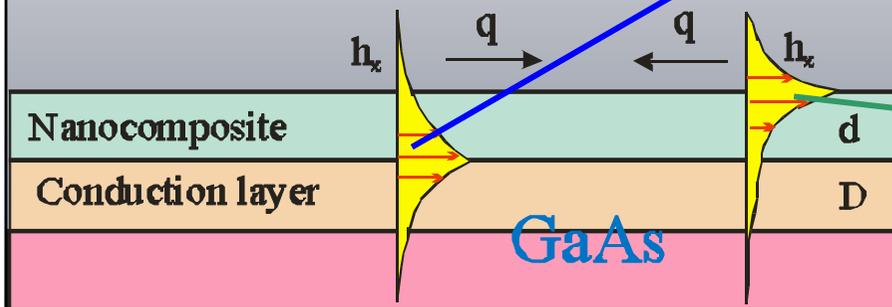
$x = 83 \text{ at.}\%$

$H = 3.0 \text{ kOe}$

$d = 600 \text{ nm}$

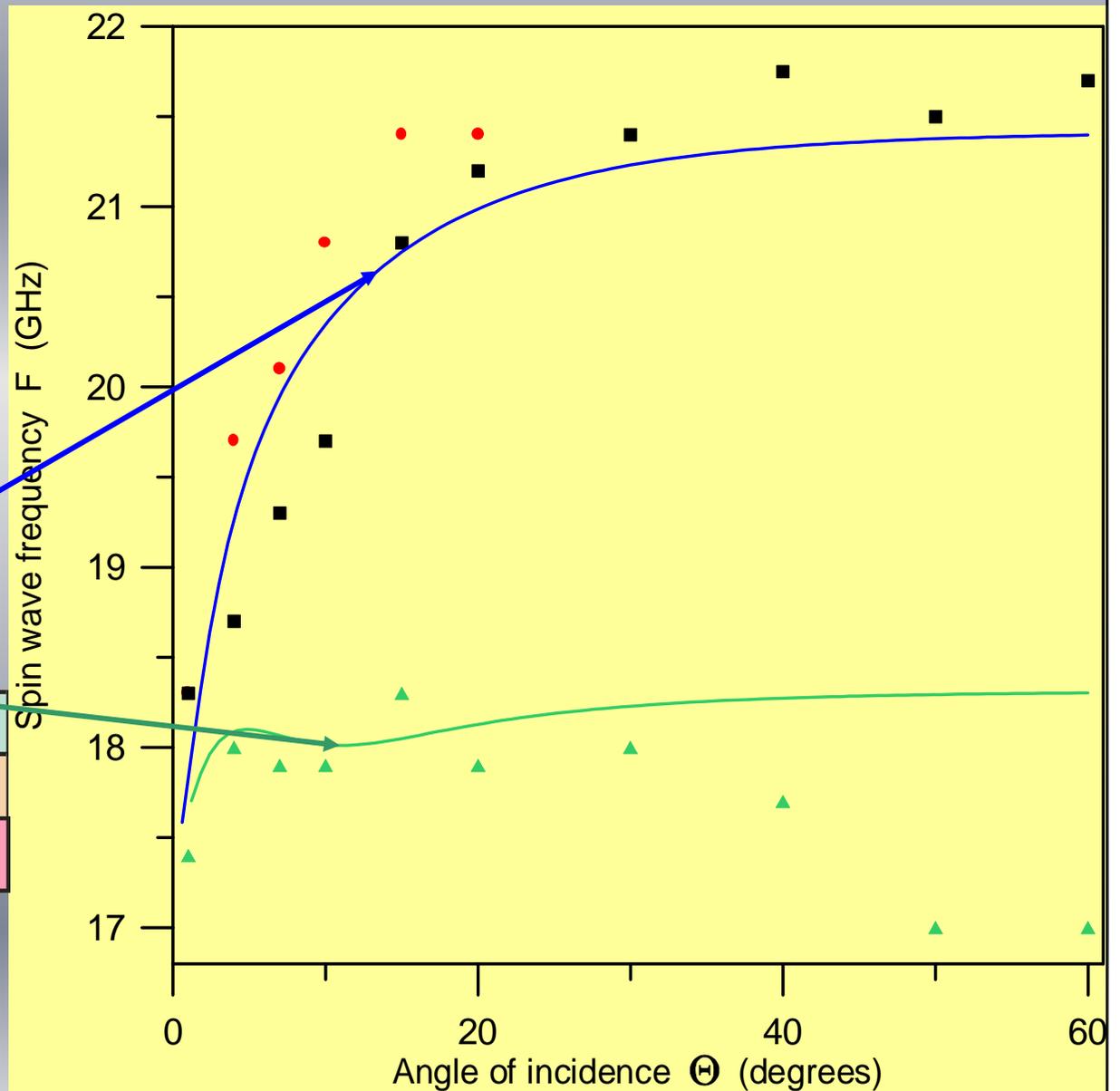
$4\pi M_S = 9.82 \text{ kOe},$

$\xi = 0.76, \zeta = 0.28$



$\xi = 0.97, \zeta = 0.92,$

$\sigma = 0, \sigma_c = 0$



$$q = (4\pi/\lambda) \sin \theta$$

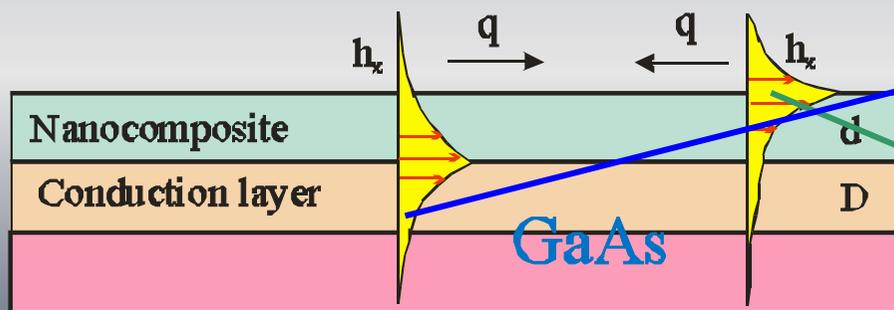
$x = 80 \text{ at.}\%$

$H = 3.0 \text{ kOe}$

$d = 120 \text{ nm}$

$4\pi M_s = 7.85 \text{ kOe},$

$\xi = 0.72, \zeta = 0.17$

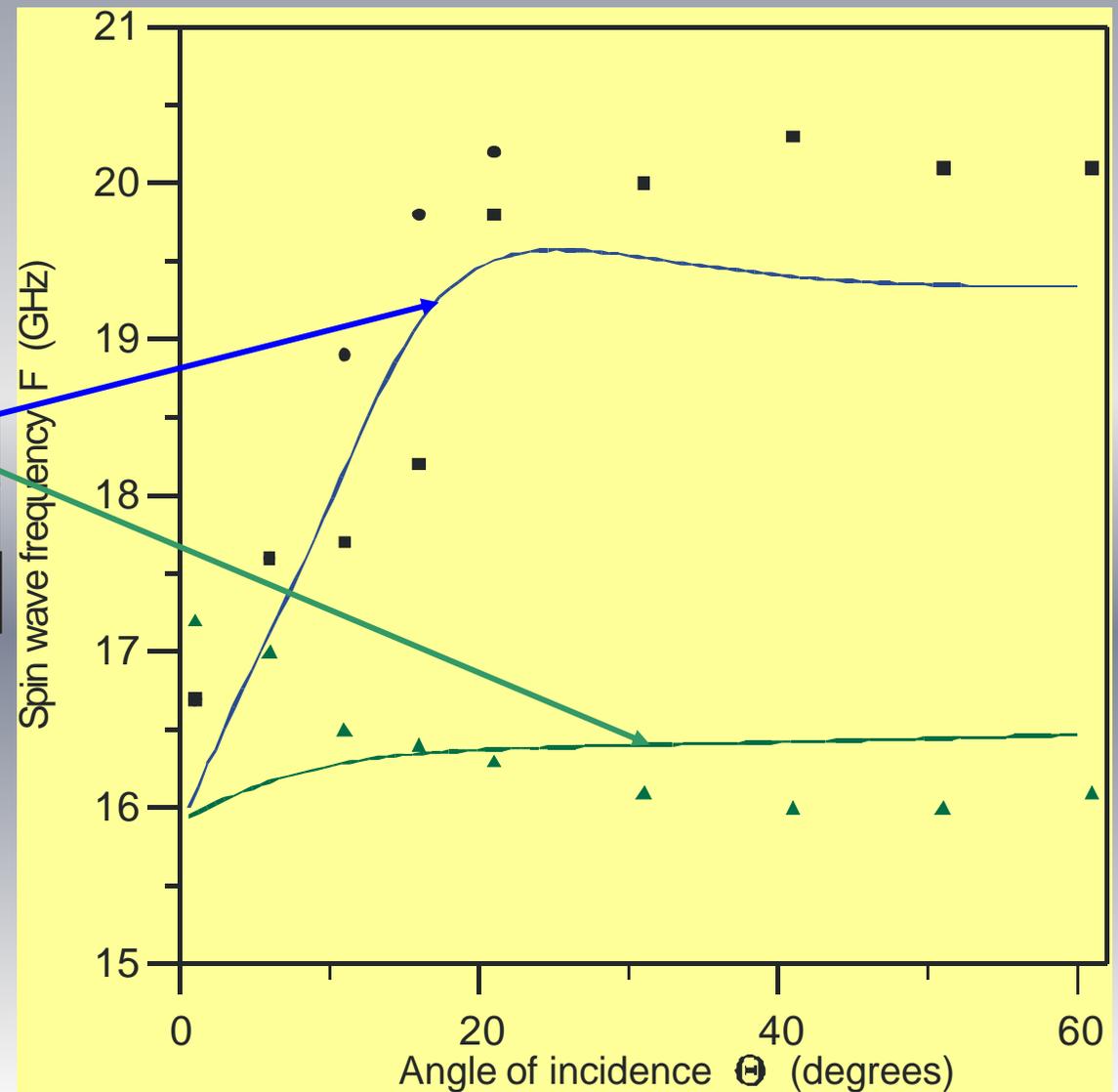


$\xi = 1.0, \zeta = 1.0,$

$\sigma = 2 \cdot 10^3 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1},$

$\sigma_c = 1.1 \cdot 10^5 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$

$D = 15 \text{ nm}$



Выводы

- Анализ главных факторов, влияющих на дисперсию спиновых волн: (а) проводимость гранулированной структуры, (b) неоднородность магнитных параметров по толщине, (с) наличие проводящего слоя вблизи гранулированной структуры, (d) наличие слоя вблизи гранулированной пленки, магнитные характеристики которого отличны от характеристик пленки, показал, что они по-разному изменяют форму дисперсионных кривых, что дает возможность определения магнитных и электрических характеристик магнитных наноструктур. Решение задачи определения этих характеристик из дисперсионных зависимостей спиновых волн позволило развить метод спинволновой спектроскопии.

- Метод спинволновой спектроскопии (длина спиновой волны $> 1 \mu\text{m}$) применен к структурам a-C:H(Cu), SiO₂ (Co), ZnO(Co), BaTiO₃(Ni), a-C:H(Co), a-SiO₂ (Co₈₆Nb₁₂Ta₂). Метод обратной задачи применен к анализу экспериментальных спинволновых дисперсионных зависимостей структур SiO₂(Co) / GaAs.

Спасибо

за внимание

