

# Магнитооптические материалы.

- Магнитооптическая добротность
  - Удельный эффект Фарадея
  - Коэффициент поглощения
- Пленки ферритов-гранатов.
  - ✓ Выращивание
  - ✓ Магнитооптические свойства
  - ✓ Эффект Фарадея в двухподрешеточном ферримагнетике

# Магнитооптические материалы.

- Ортоферриты
  - Получение, магнитооптические свойства
- Борат железа
  - Получение, магнитооптические свойства

# Ортоферриты $RFeO_3$ .

- Слабые ферромагнетики – антиферромагнетики с небольшим спонтанным ферромагнитным моментом, возникающим из-за наклона магнитных подрешеток.
- Теорию слабых ферромагнетиков построил в 1957 г. Дзялошинский, основываясь на термодинамической теории фазовых переходов второго рода Ландау-Лифшица.
- Микроскопическая теория слабого ферромагнетизма была построена Мория. Он показал, что из-за анизотропного косвенного обмена возникает вклад в энергию  $\sim [M_1 M_2]$ .
- Слабый ферромагнетизм невозможен в структурах, где магнитная элементарная ячейка не совпадает с кристаллографической.
- Поведение слабых ферромагнетиков во внешнем магнитном поле аналогично поведению обычных антиферромагнетиков. Нужно лишь учесть влияние эффективного внутреннего поля Дзялошинского, приводящего к неколлинеарности подрешеток.



**Дзялошинский Игорь  
Ехиельевич 1931 г.р.**

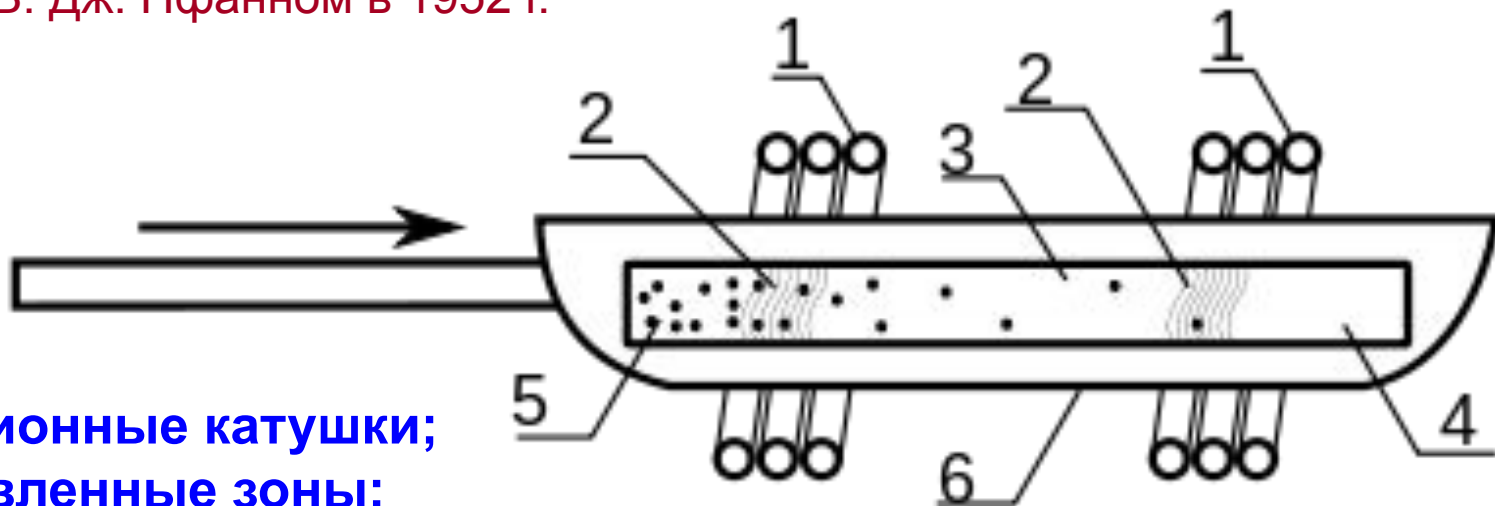
Окончил МГУ (1953).  
Член-корреспондент АН  
СССР с 1974 года.

- ✓ Ученик Л.Д.Ландау и его сотрудник на протяжении более 20 лет, один из основателей и многолетний сотрудник Института теоретической физики АН СССР.
- ✓ С начала 90-х проживает в США и работает в Калифорнийском Университете (профессор, почетный профессор)
- ✓ Соавтор научного открытия «Магнитоэлектрический эффект», которое занесено в Государственный реестр открытий СССР под № 123 с приоритетом от 1957 г. в следующей формулировке:  
*«Установлено неизвестное ранее явление намагничивания ряда веществ в антиферромагнитном состоянии электрическим полем и их электрической поляризации магнитным полем, обусловленное специфической симметрией расположения магнитных моментов в кристаллической решетке вещества».*

# Получение ортоферритов

Монокристаллы ортоферритов можно получать разными методами, например из раствора-расплава. Такие кристаллы имеют много дефектов. Наиболее высококачественные монокристаллы ортоферритов выращивают методом зонной плавки с радиационным нагревом.

**Зонная плавка** — метод очистки твердых веществ, основанный на различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазах. Метод был предложен В. Дж. Пфанном в 1952 г.



1 — индукционные катушки;

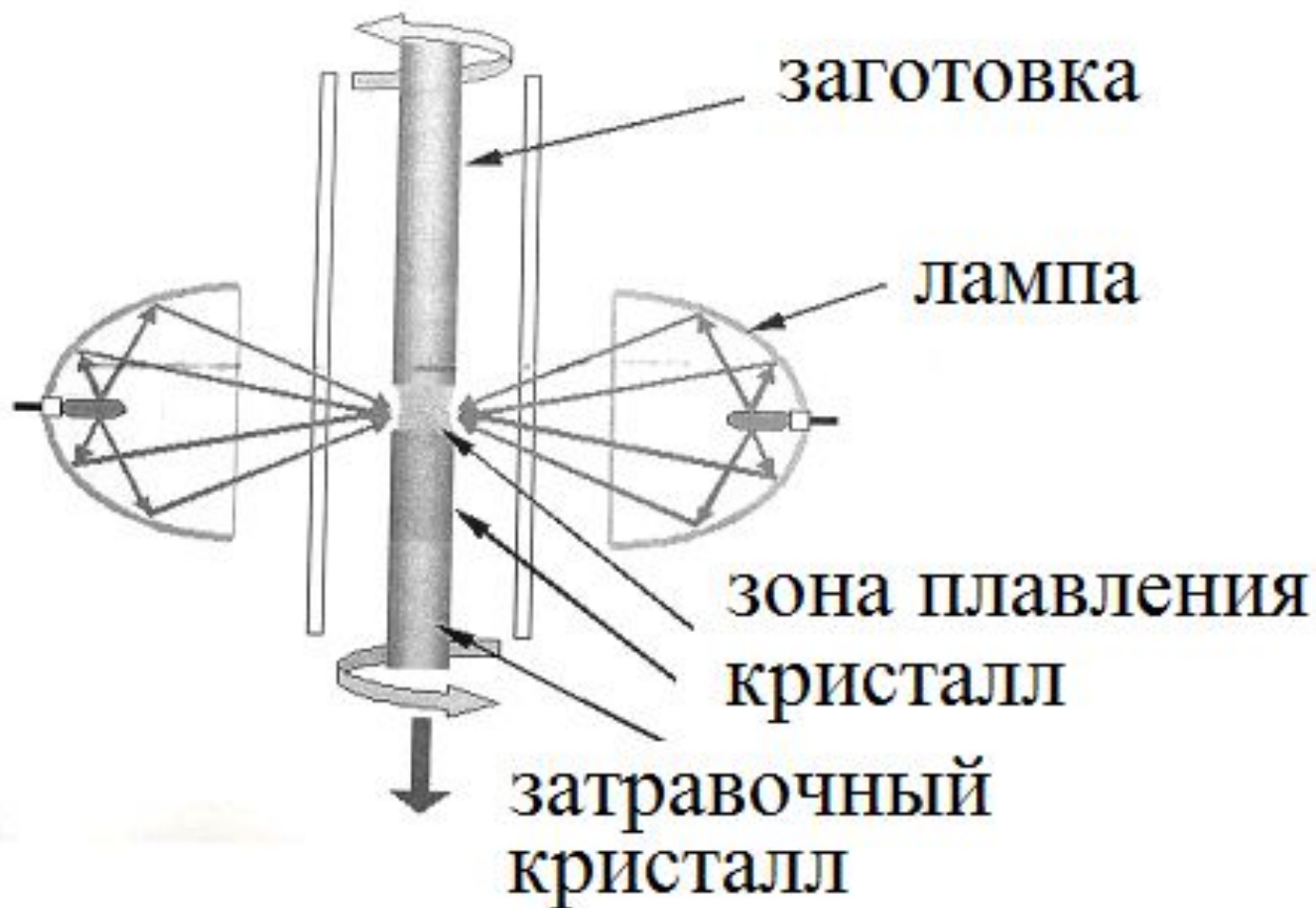
2 — расплавленные зоны;

3 — очищенный кристалл; 4 — сверхчистый кристалл;

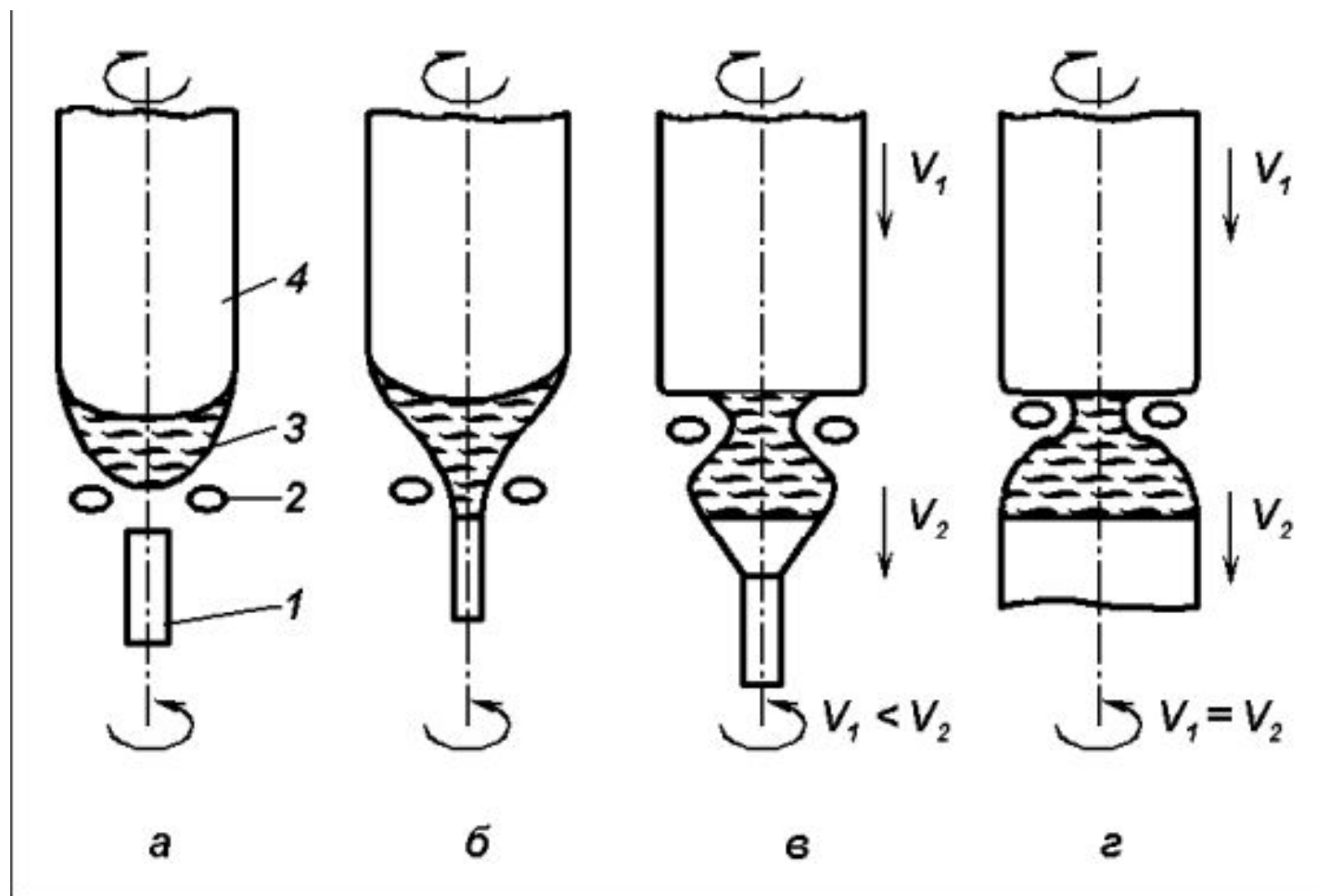
5 — кристалл с повышенным содержанием примесей;

6 — графитовая лодочка;

# Схема установки бестигельной вертикальной зонной плавки



# Этапы процесса выращивания кристалла методом бестигельной зонной плавки



# Основные свойства ортоферритов

- Оси  $x$ ,  $y$  и  $z$  совпадают с осями  $a$ ,  $b$  и  $c$  кристалла.
- При высоких температурах во всех ортоферритах векторы  $l$  и  $m$  ориентированы вдоль осей  $a$  и  $c$  соответственно.
- При комнатной температуре во всех ортоферритах, кроме самариевого, упорядочение  $G_x F_z$ .
- Только в ортоферрите диспрозия при температуре ниже 40 К наблюдается упорядочение  $G_y$ .
- Угол отклонения магнитных подрешеток от «антиферромагнитной» ориентации составляет для всех ортоферритов примерно  $0,5^\circ$ .
- Температуры Нееля заключены в интервале  $670 \pm 50^\circ \text{ К}$ .



# Элементарная ячейка ортоферрита $\text{YFeO}_3$ .

Элементарная ячейка содержит четыре иона  $\text{Fe}^{3+}$

$$\vec{I}_1; \vec{I}_2; \vec{I}_3; \vec{I}_4$$

Намагниченности  
железных подрешеток

Антиферромагнитный  
вектор

$$\vec{G} = \frac{\vec{I}_1 - \vec{I}_2 + \vec{I}_3 - \vec{I}_4}{4}$$

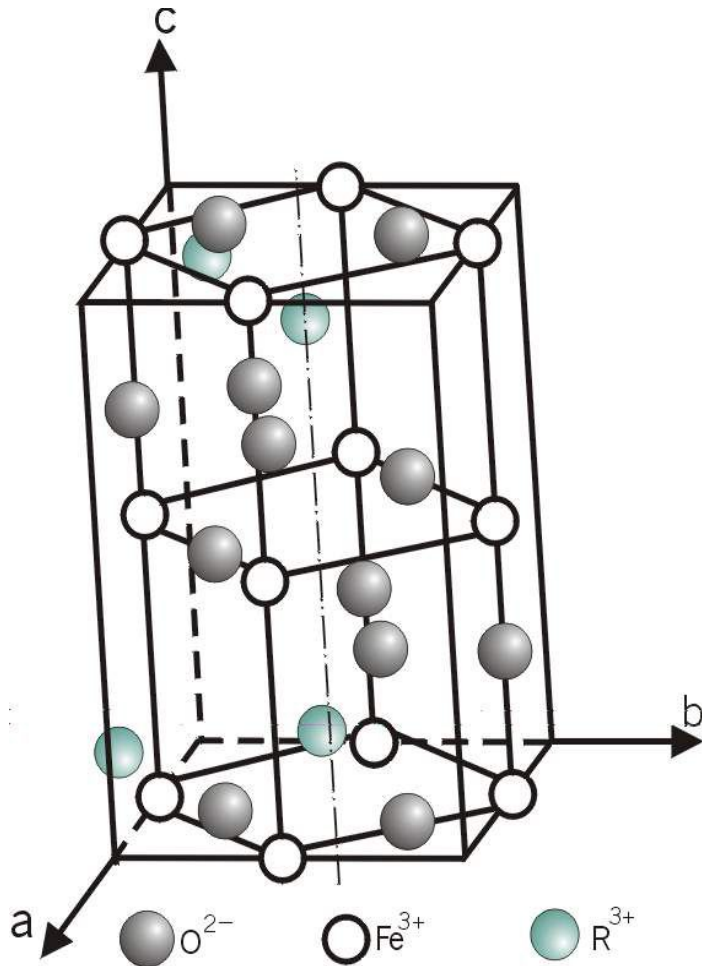
Вектор слабого  
ферромагнетизма

$$\vec{F} = \frac{\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 + \vec{I}_4}{4}$$

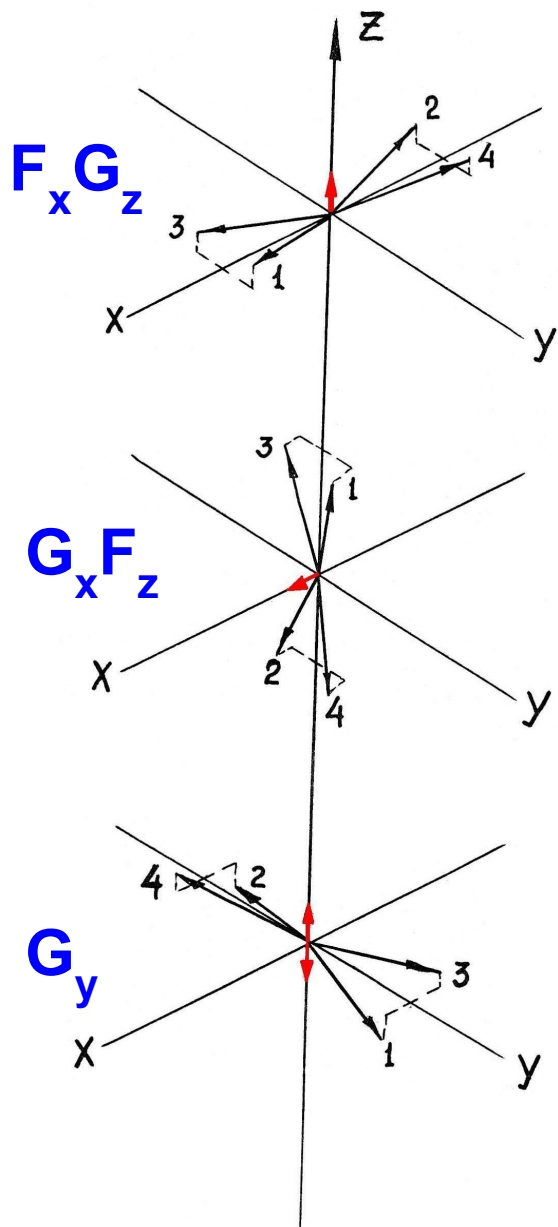
Намагниченности  
подрешеток

$$\vec{M}_1 = \vec{I}_1 + \vec{I}_3 \quad \vec{M}_2 = \vec{I}_2 + \vec{I}_4$$

$$|\vec{M}_1| = |\vec{M}_2| = M_o$$



## Спиновые конфигурации ортоферрита $\text{YFeO}_3$ .



Нормированные вектора намагниченности и слабого ферромагнетизма

$$\vec{m} = \frac{\vec{M}_1 + \vec{M}_2}{2 \cdot M_o} \quad \vec{l} = \frac{\vec{M}_1 - \vec{M}_2}{2 \cdot M_o}$$

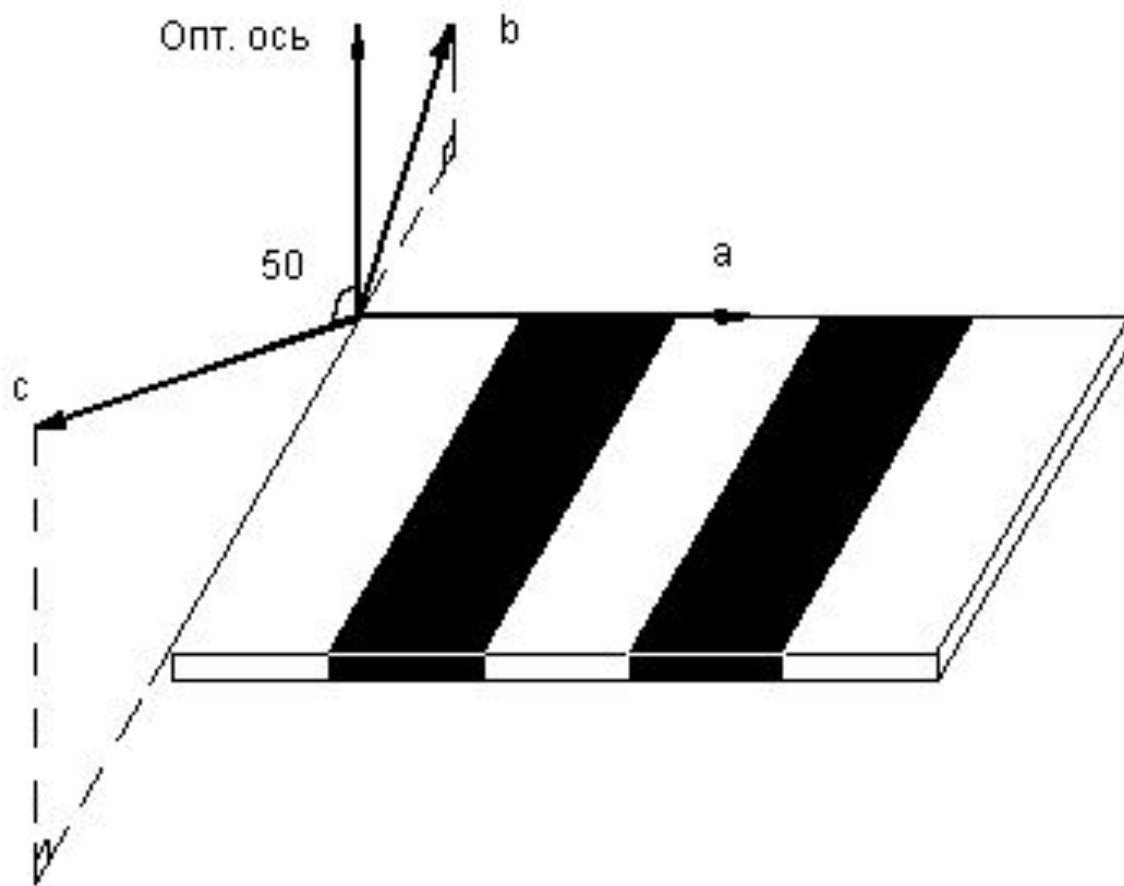
$$(\vec{m} \cdot \vec{l}) = 0 \quad \vec{m}^2 + \vec{l}^2 = 1$$

У ортоферритов существуют упорядочения:  $\mathbf{G}_x \mathbf{F}_z$  (ось легкого намагничивания - а),  $\mathbf{F}_x \mathbf{G}_z$  (ось легкого намагничивания - с),  $\mathbf{G}_y$  (чисто антиферромагнитная фаза).

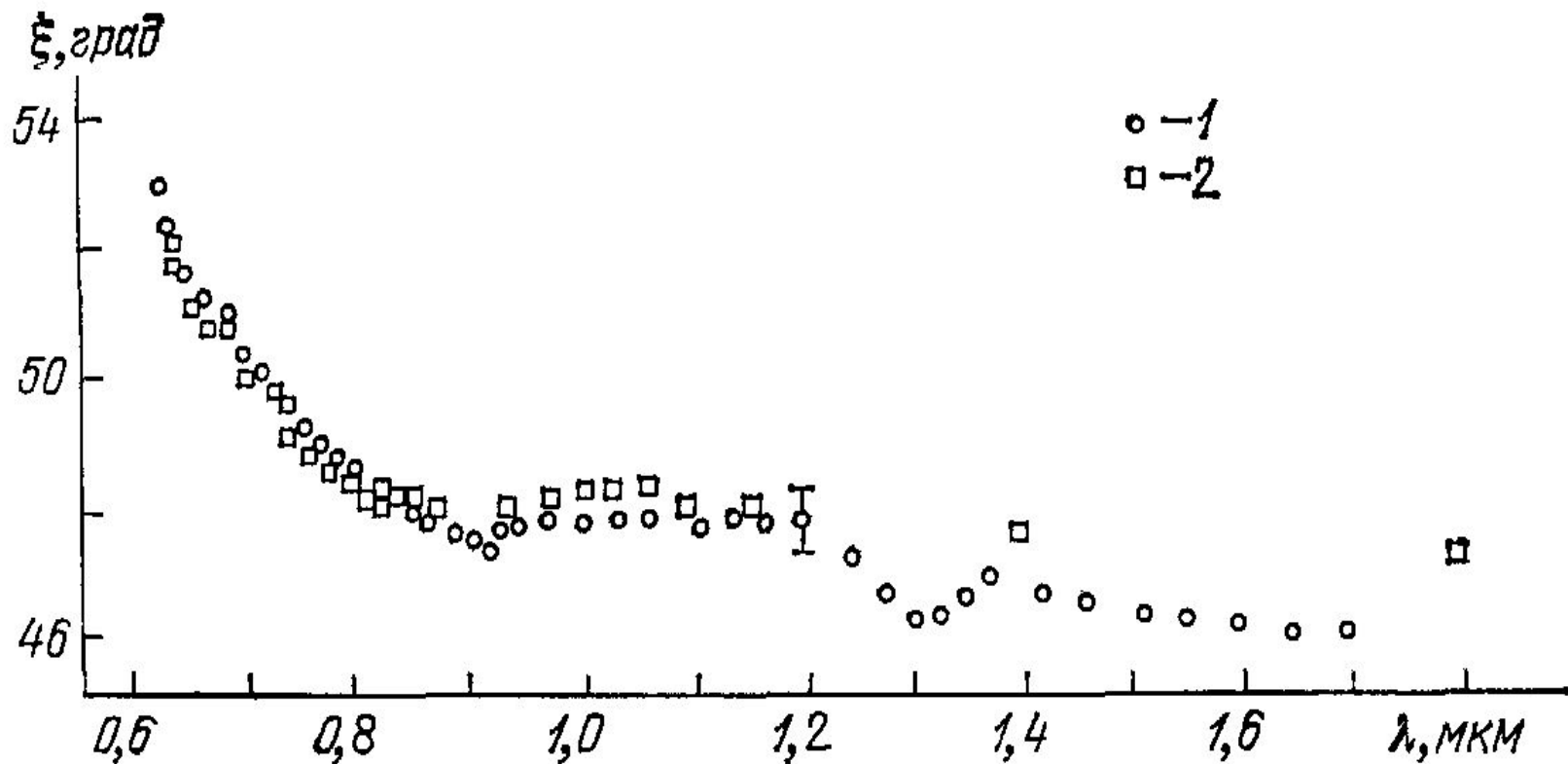
# Основные свойства ортоферритов

- Оси  $x$ ,  $y$  и  $z$  совпадают с осями  $a$ ,  $b$  и  $c$  кристалла.
- При высоких температурах во всех ортоферритах векторы  $l$  и  $m$  ориентированы вдоль осей  $a$  и  $c$  соответственно.
- При комнатной температуре во всех ортоферритах, кроме самариевого, упорядочение  $G_x F_z$ .
- Только в ортоферрите диспрозия при температуре ниже 40 К наблюдается упорядочение  $G_y$ .
- Угол отклонения магнитных подрешеток от «антиферромагнитной» ориентации составляет для всех ортоферритов примерно  $0,5^\circ$ .
- Температуры Нееля заключены в интервале  $670 \pm 50^\circ \text{K}$ .

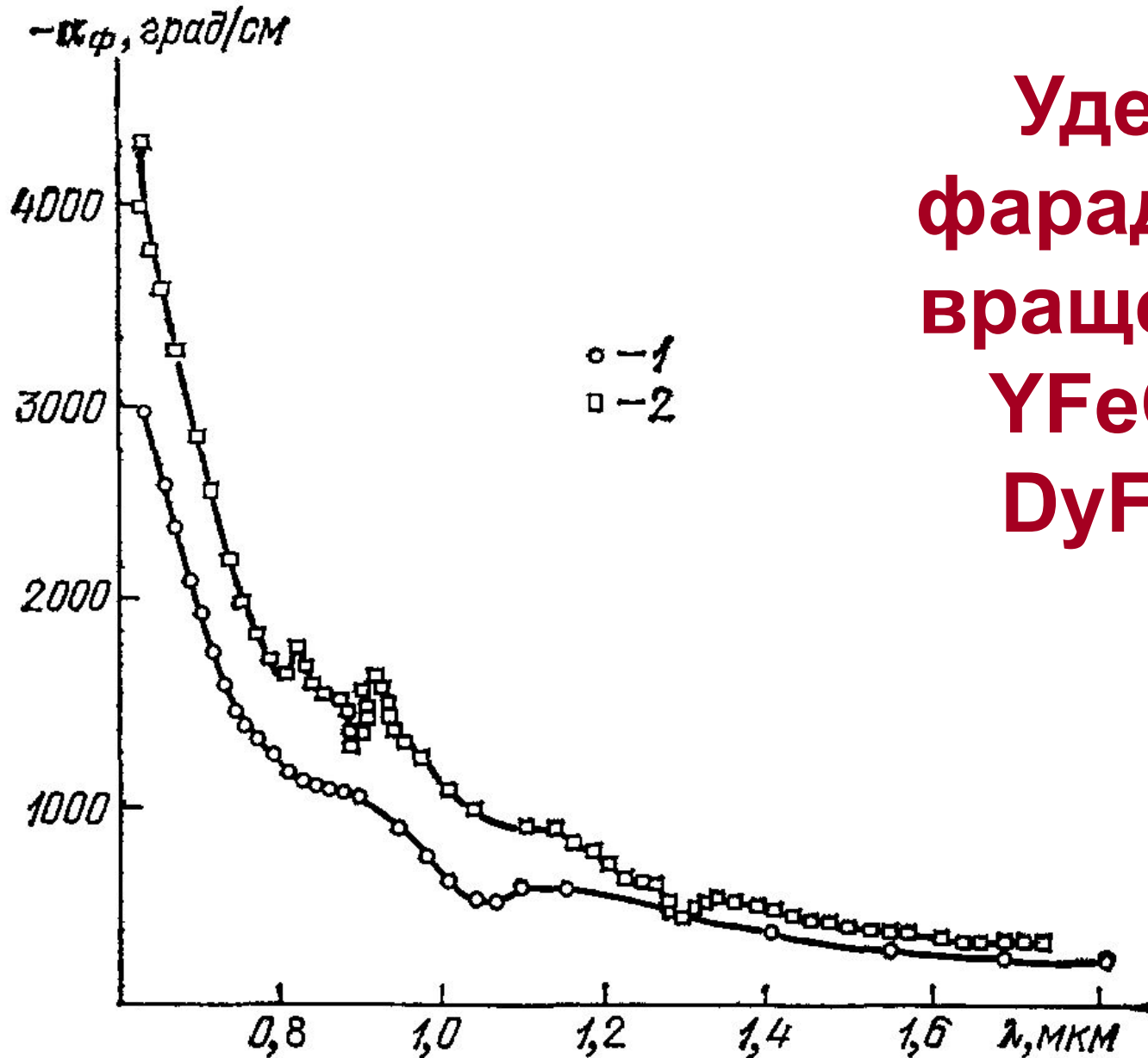
# Страйп-структура в пластинке ортоферрита, вырезанной перпендикулярно оптической оси

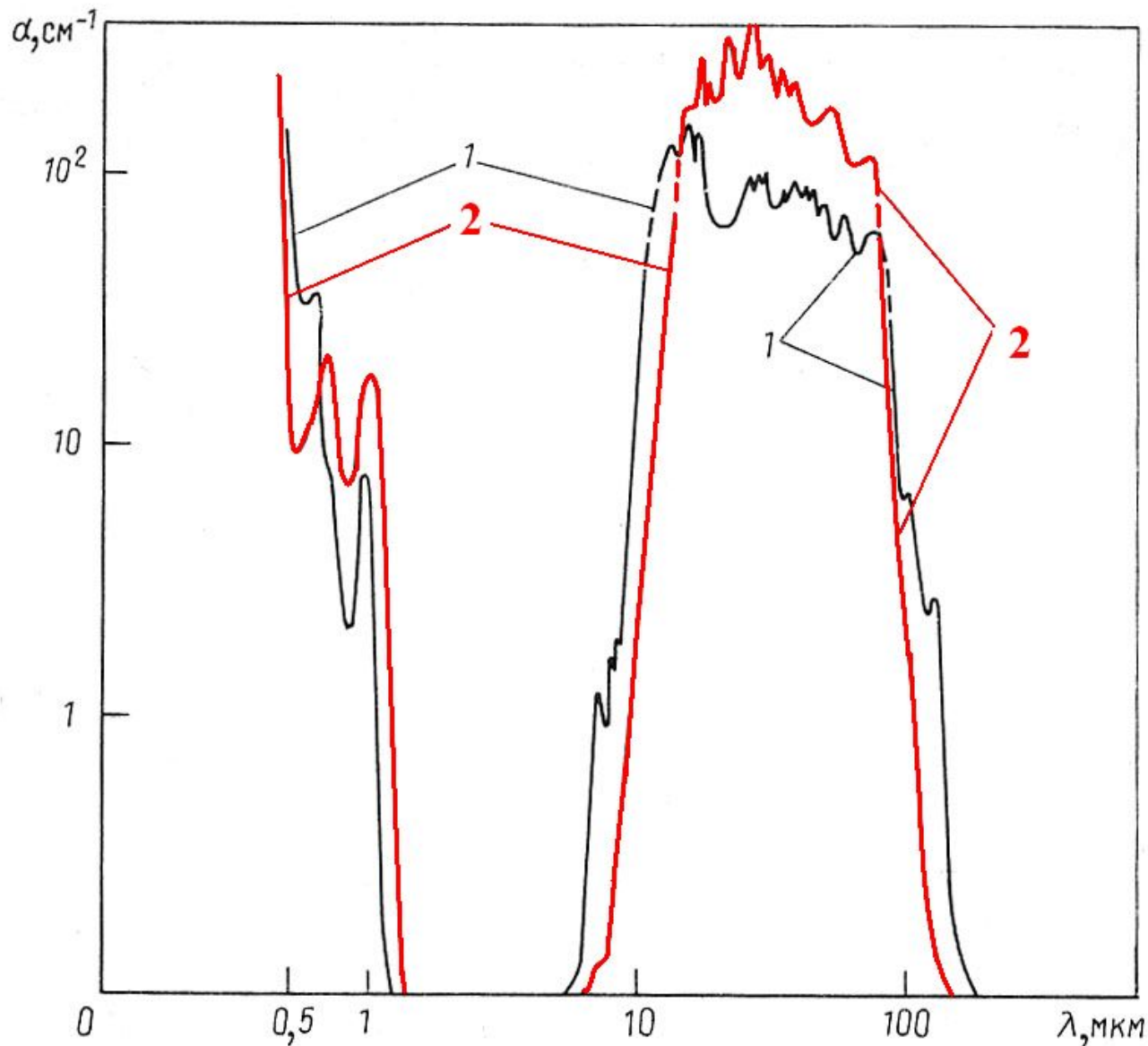


Угол между оптической осью и осью  $c$  в плоскости  $(ab)$  для  $YFeO_3$  (1) и  $DyFeO_3$  (2).



**Удельное  
фарадеевское  
вращение для  
 $\text{YFeO}_3$  (1) и  
 $\text{DyFeO}_3$  (2).**

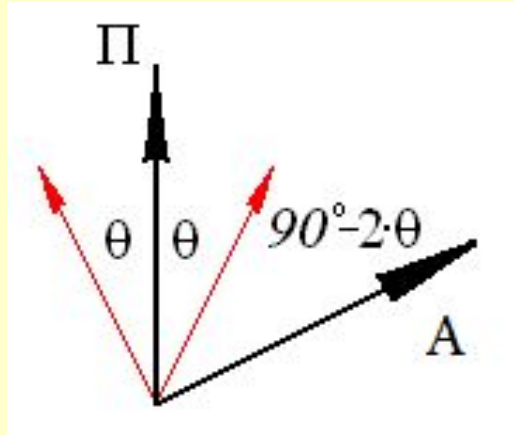




**Спектры  
поглощения  
феррита-  
граната (1) и  
ортоферрита  
(2)**

Рандошкин В.В.  
Червоненкис А.Я.  
Прикладная  
магнитооптика.  
Москва.  
Энергоатом издат.  
1990

# Магнитооптическая добротность



$I$  – интенсивность света, прошедшего через пластинку толщиной  $z$ ,  
 $I_0$  – интенсивность падающего света,  
 $\alpha$  – коэффициент поглощения,  
 $\varphi$  – угол падения.

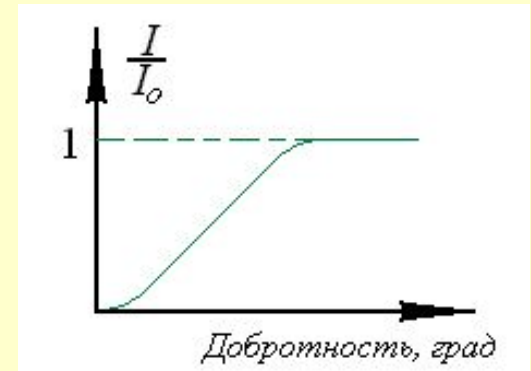
$$I = I_0 e^{-\alpha z} \cos^2 \varphi$$

$$I = I_0 e^{-\alpha \cdot z} \cos^2 \varphi = I_0 e^{-\alpha \cdot z} \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} - 2\theta \right) = I_0 e^{-\alpha \cdot z} \sin^2 (2\theta_F z)$$

$\theta_F$  – удельное фарадеевское вращения.

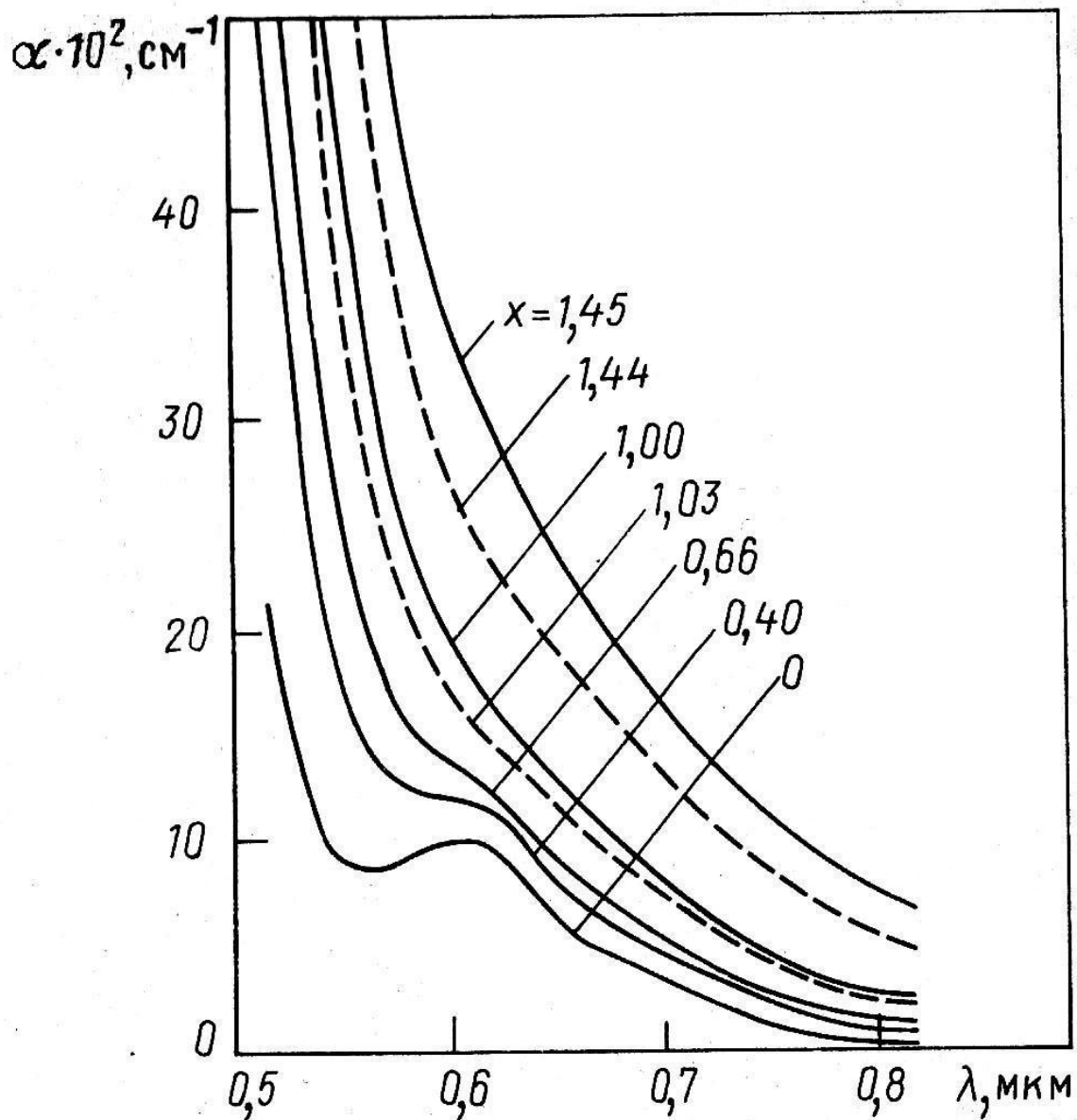
$$\frac{2 \cdot \theta_F}{\alpha}$$

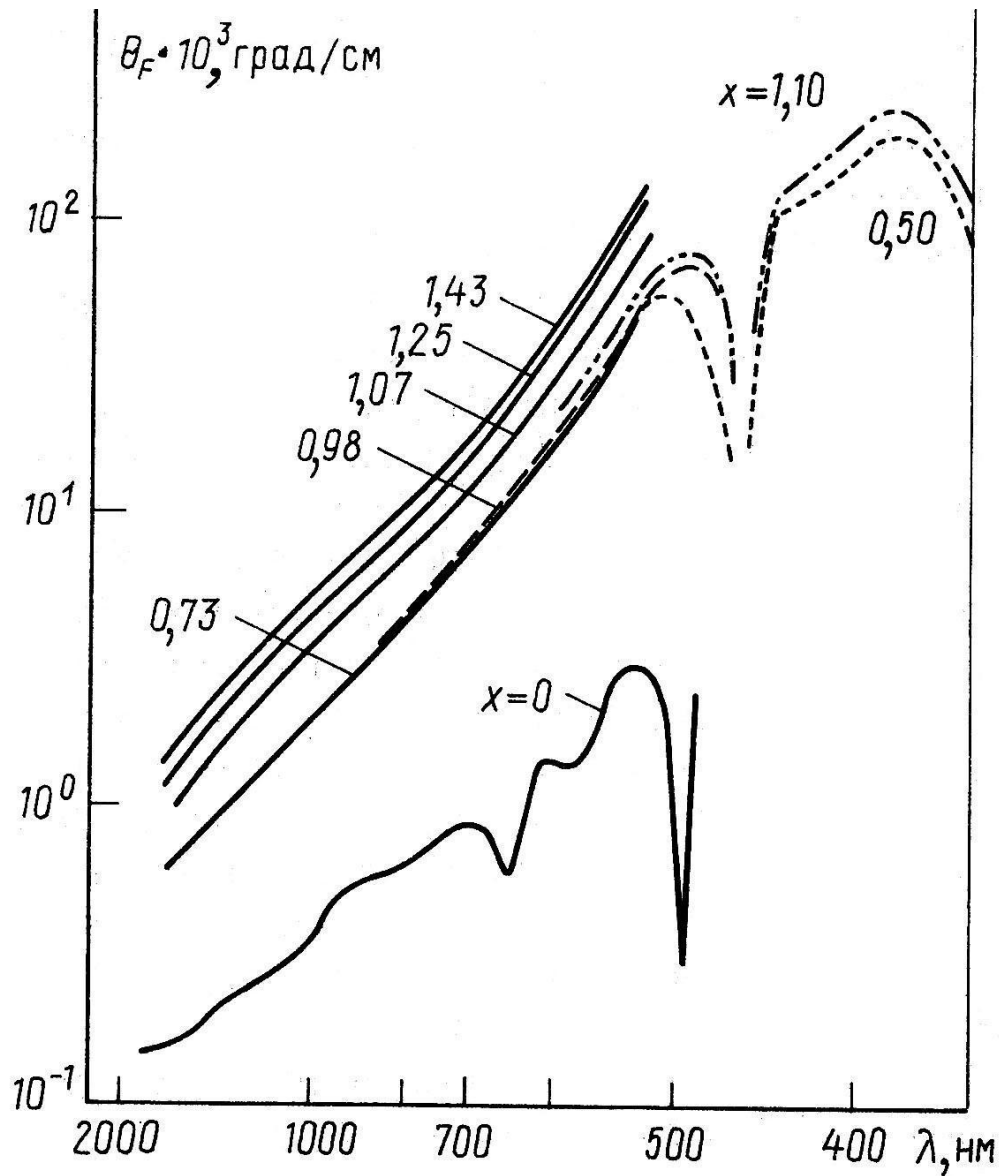
- магнитооптическая добротность





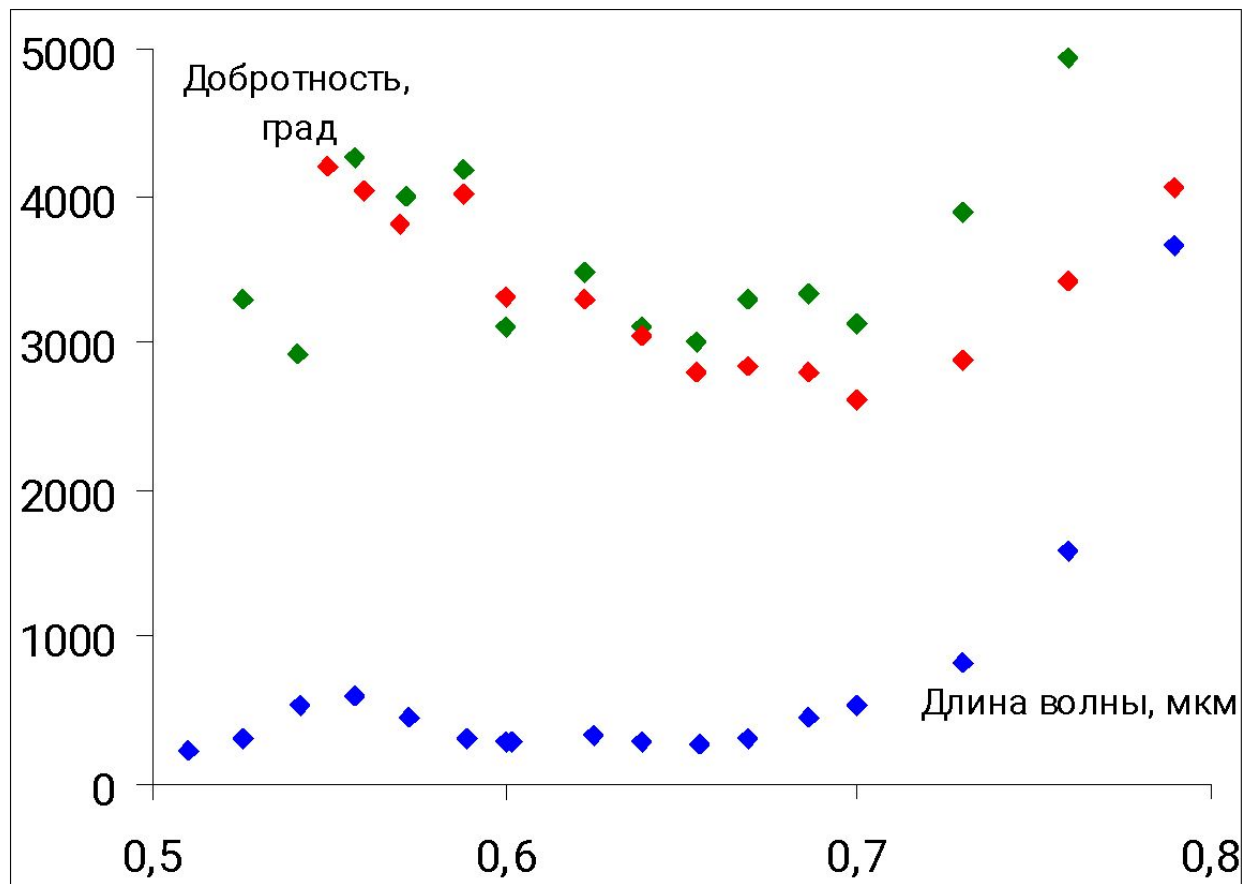
**Спектры  
поглощения  
системы  
 $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$  с  
различным  
содержанием  
висмута.**





**Спектры  
 удельного  
 фарадеевского  
 вращения  
 системы  
 $R_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$  с  
 различным  
 содержанием  
 висмута.**

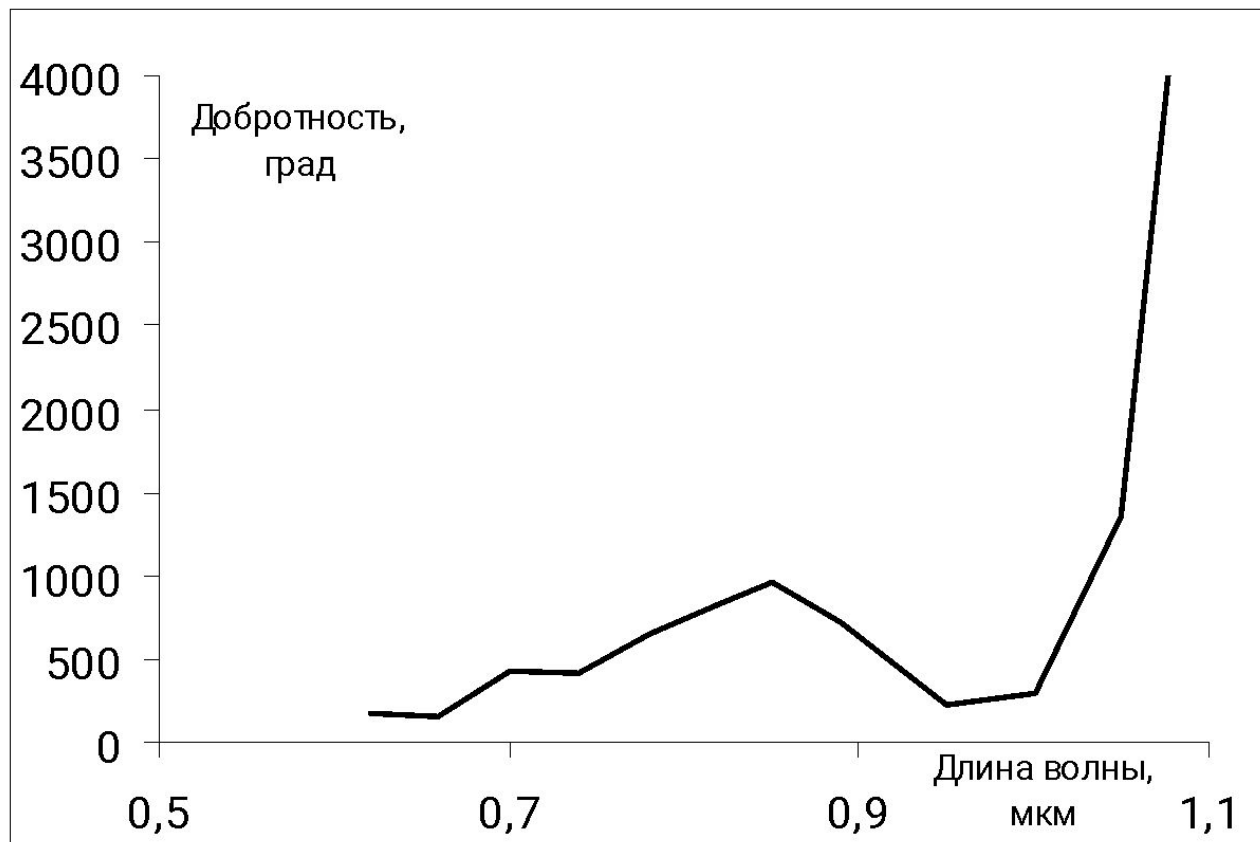
Зависимость магнитооптической добротности от длины волны для пленок  $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$  ( $x=0; 1,03; 1,43$ ).



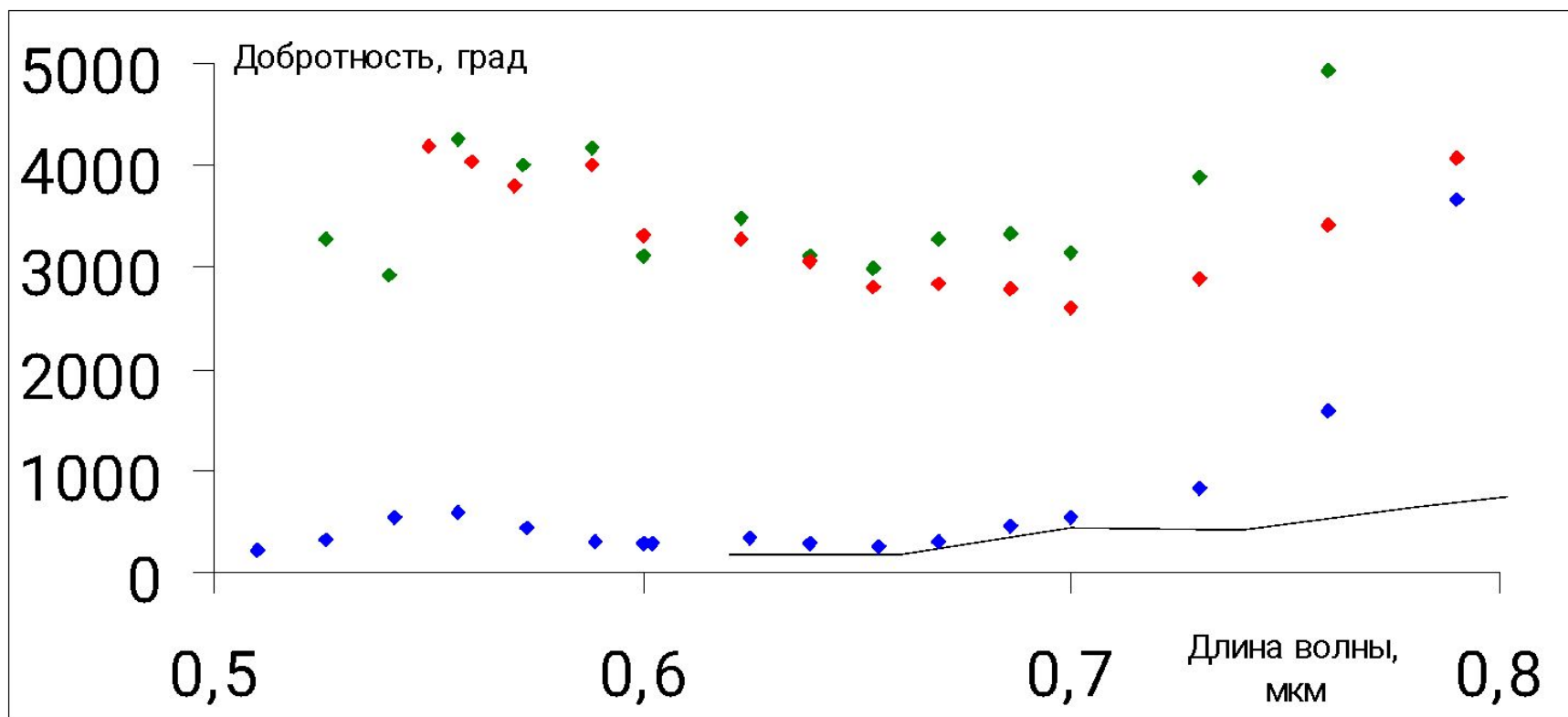
Лабиринтная доменная структура в пленке феррита-граната (период около 100 мкм).



# Зависимость магнитооптической добротности от длины волны для ортоферрита $\text{YFeO}_3$ .



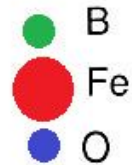
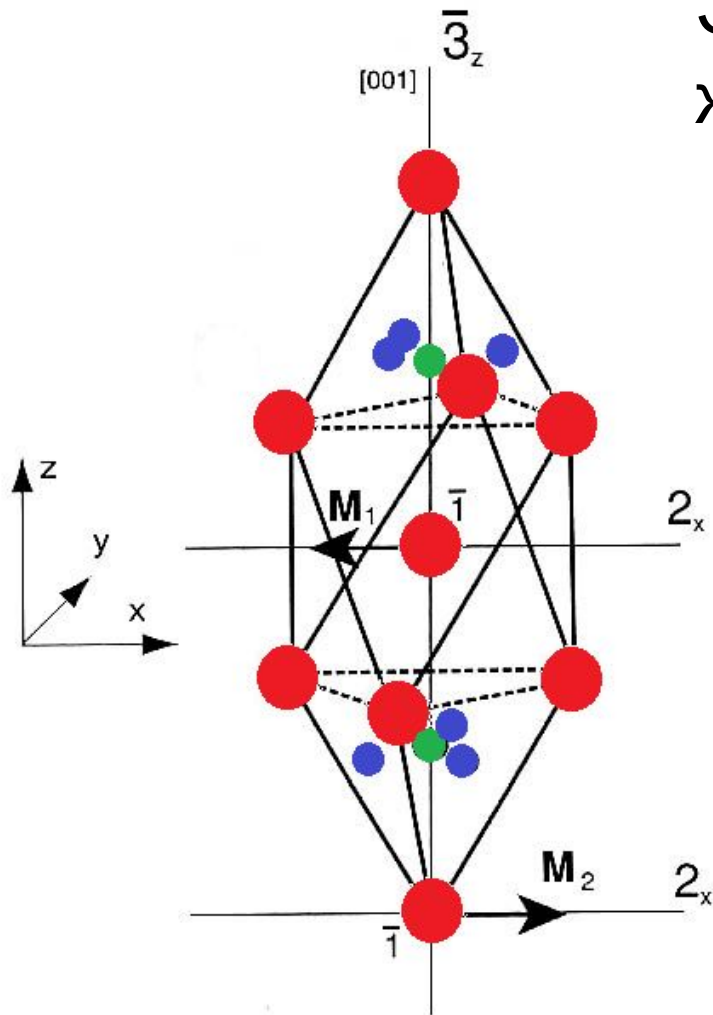
Сравнение зависимостей магнитооптической добротности от длины волны для пленок  $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$  ( $x=0; 1,03; 1,43$ ) и ортоферритов.



# Борат железа $\text{FeVO}_3$

Элементарная ячейка бората железа.

Известен с 1963 г. Структурные параметры более точно определены Дилом в 1975 г.



Слабый ферромагнетик.  
В элементарной ячейке  
содержится две  
формульные единицы:

(a) Магнитная структура  $\text{FeVO}_3$ .

Существуют два вида спиновой прецессии:

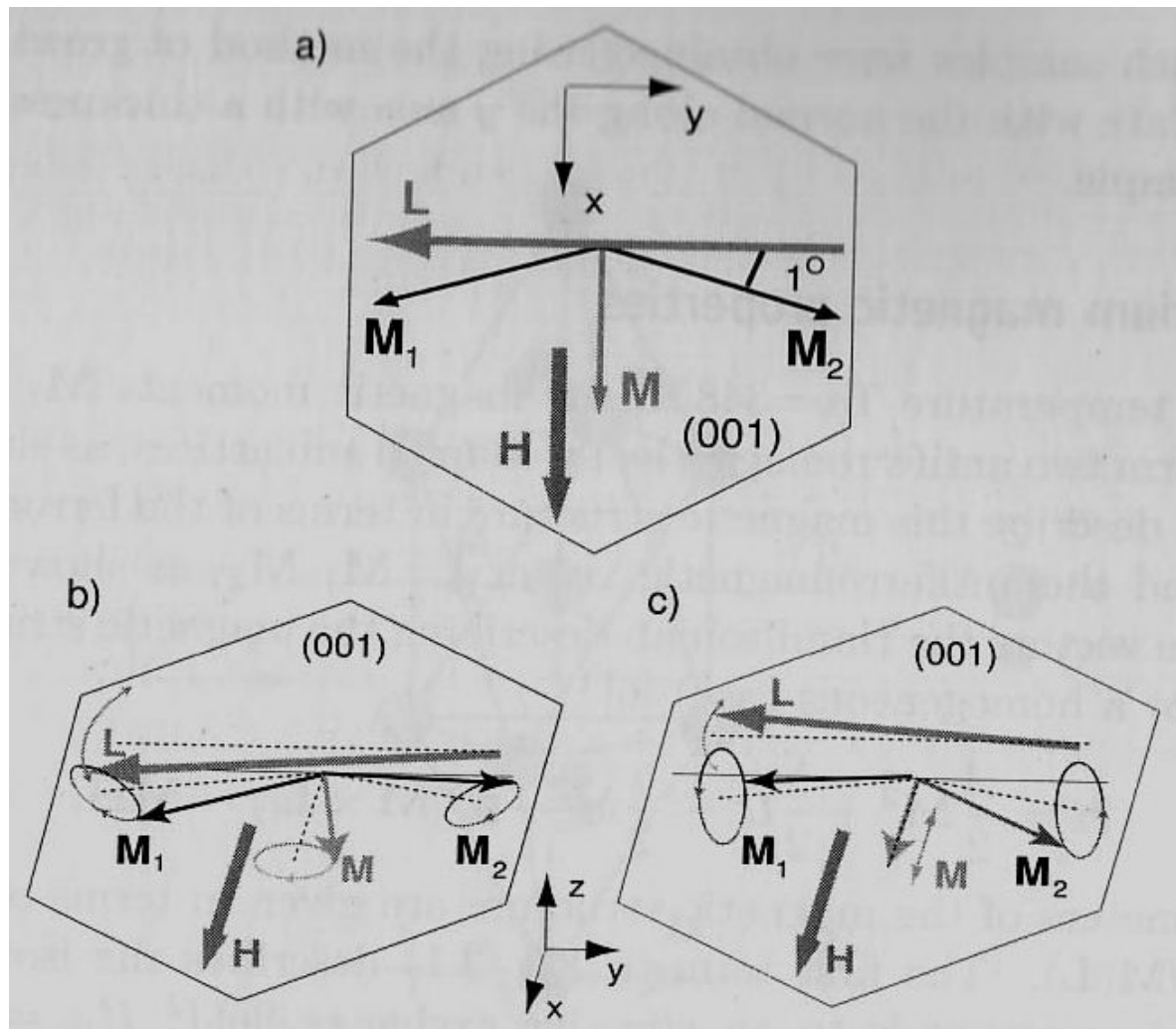
(b) квазиферромагнитная

(c) квазиантиферромагнитная

Намагниченности  
подрешеток

$M_1 = M_2 = 280$  Гс при  
 $T = 300$  К.

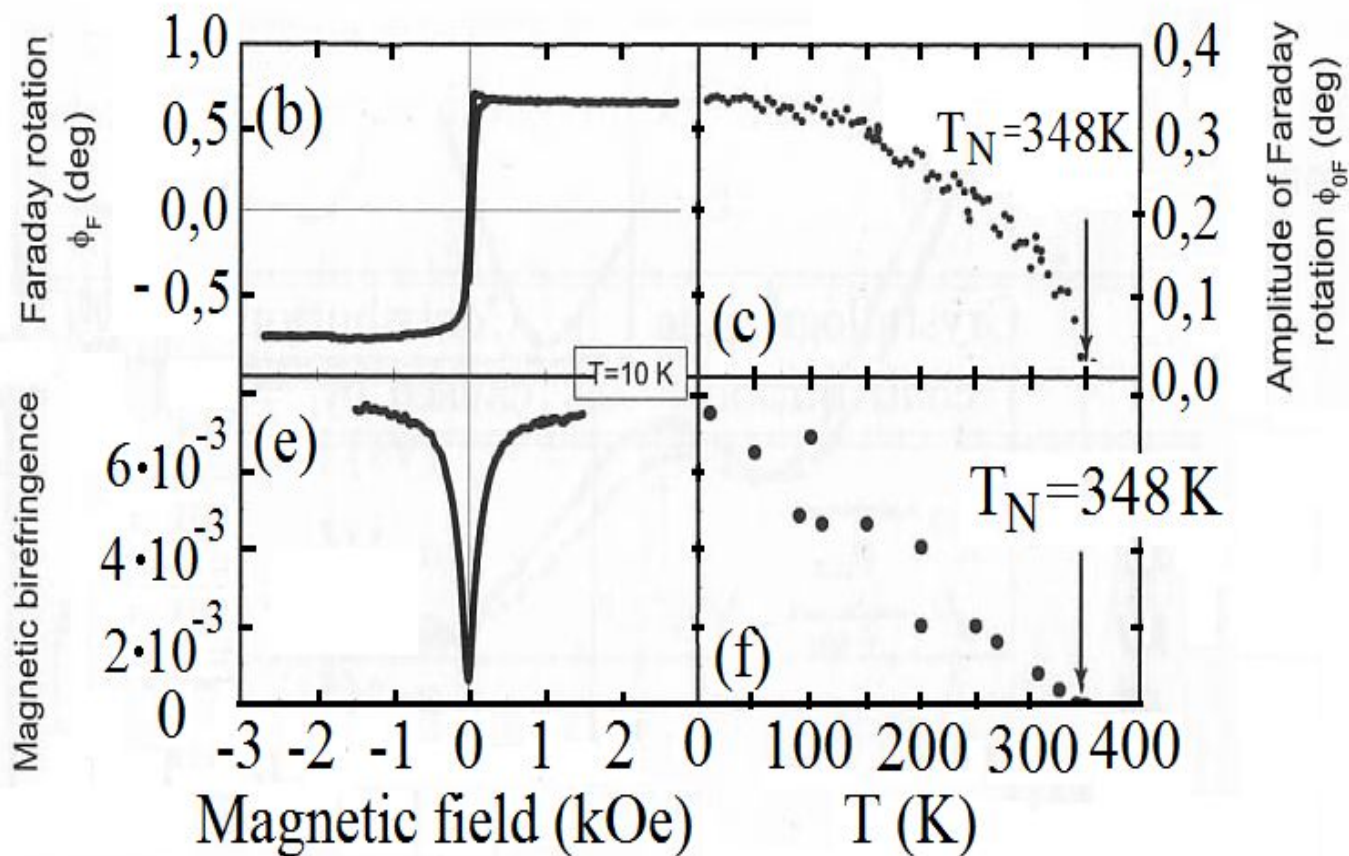
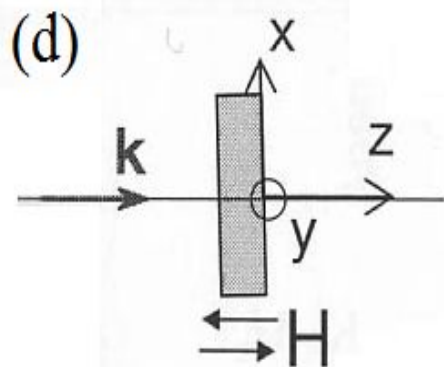
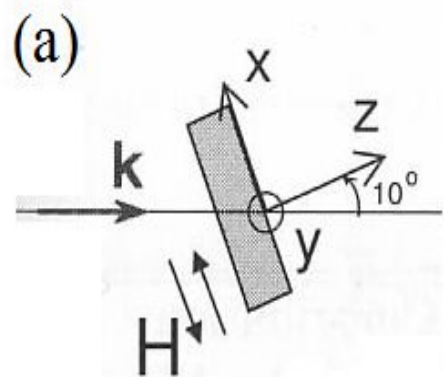
Угол скоса  
определяется  
величинами  
симметричного и  
антисимметричного  
обмена



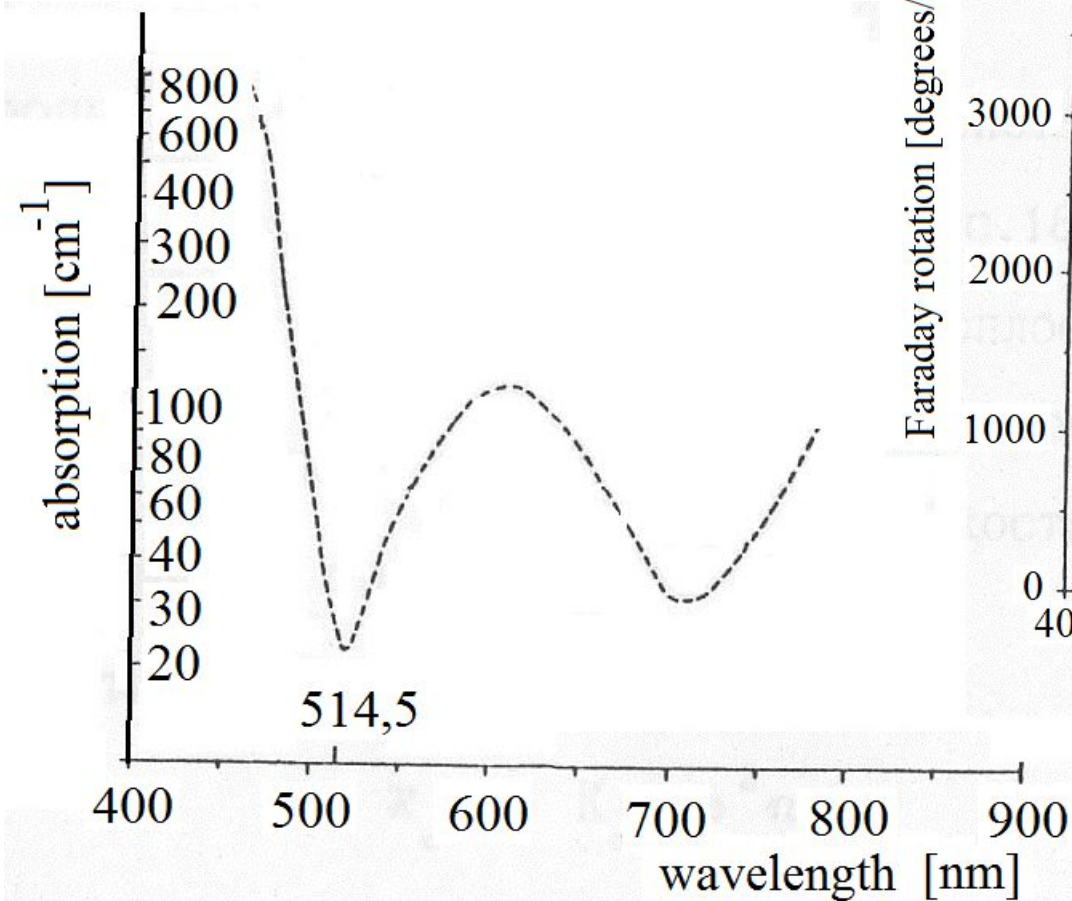
$\phi = H_D / 2H_E \approx 1^\circ$ , где  
 $H_D = 82$  кЭ (поле  
Дзялошинского) и  
 $H_E = 1,6 \cdot 10^3$  кЭ  
(обменное поле)



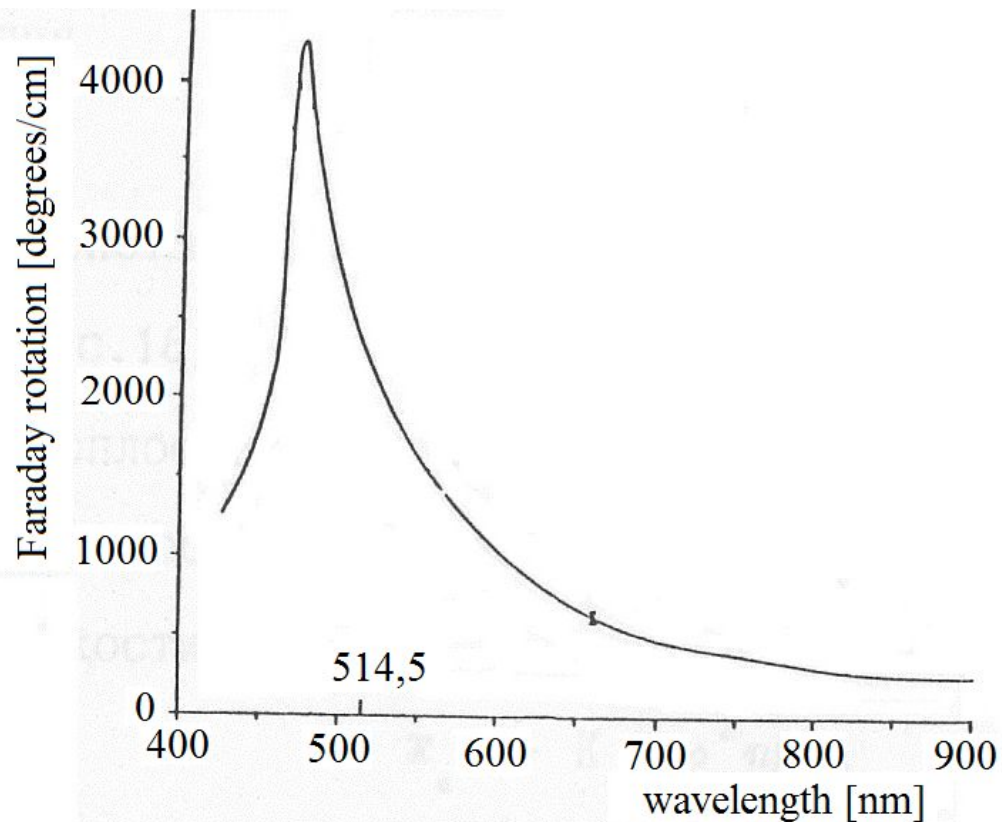
Полевая (b) и температурная (c) зависимости вращения Фарадея, измеренного в геометрии (a).  
 Полевая (e) и температурная (f) зависимости магнитного линейного двулучепреломления, измеренного в геометрии (d).



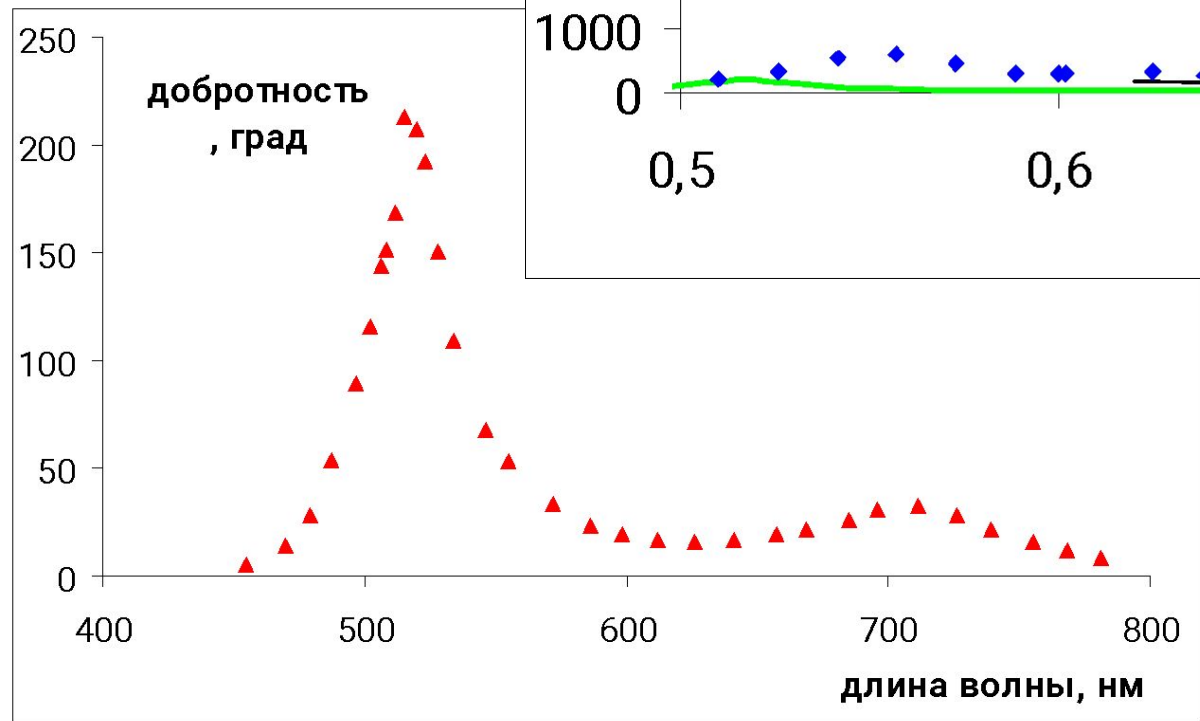
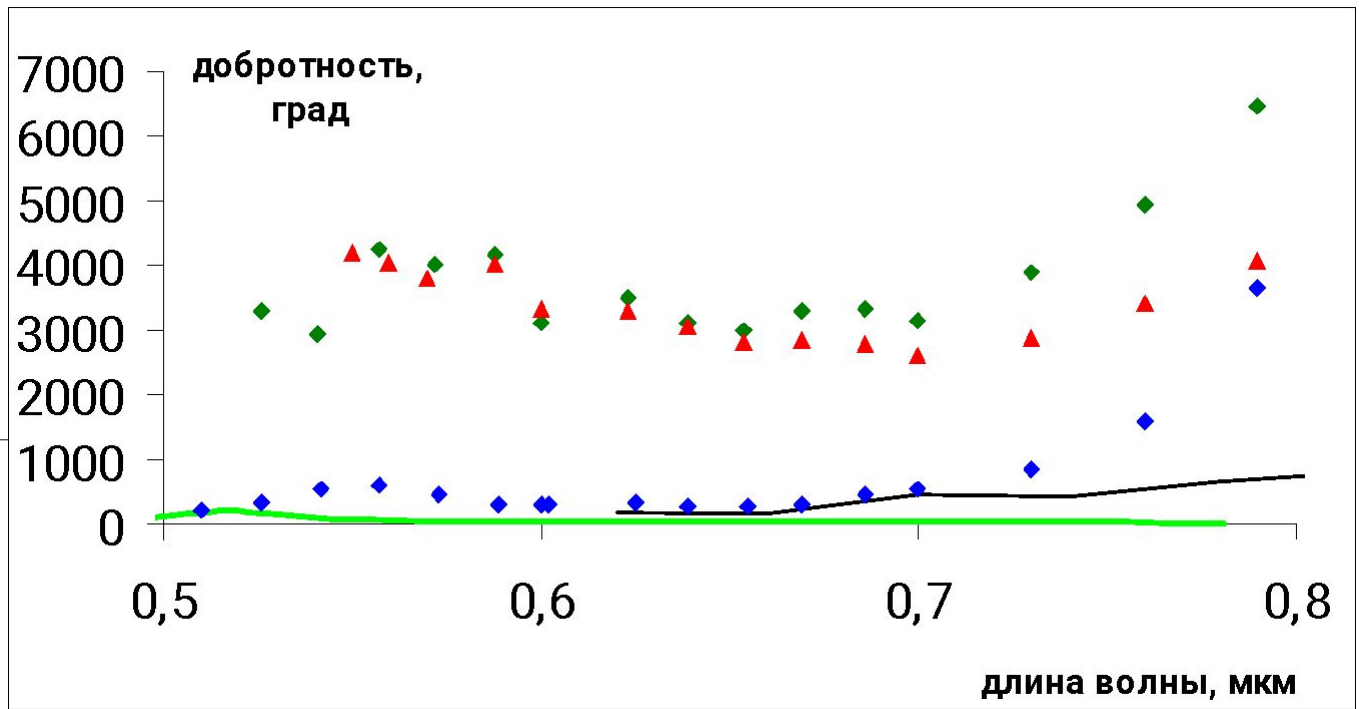
# Оптические свойства



**Оптическое поглощение в борате железа.**

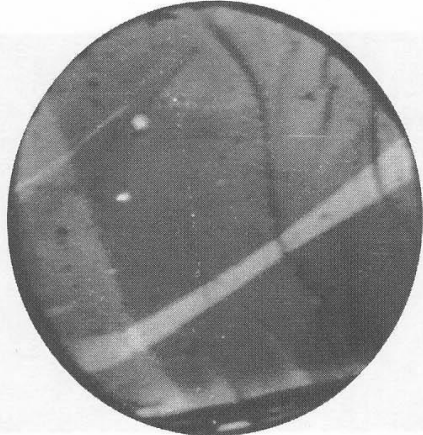
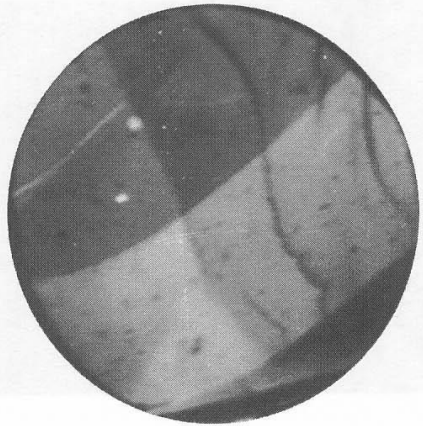


**Эффект Фарадея в борате железа**



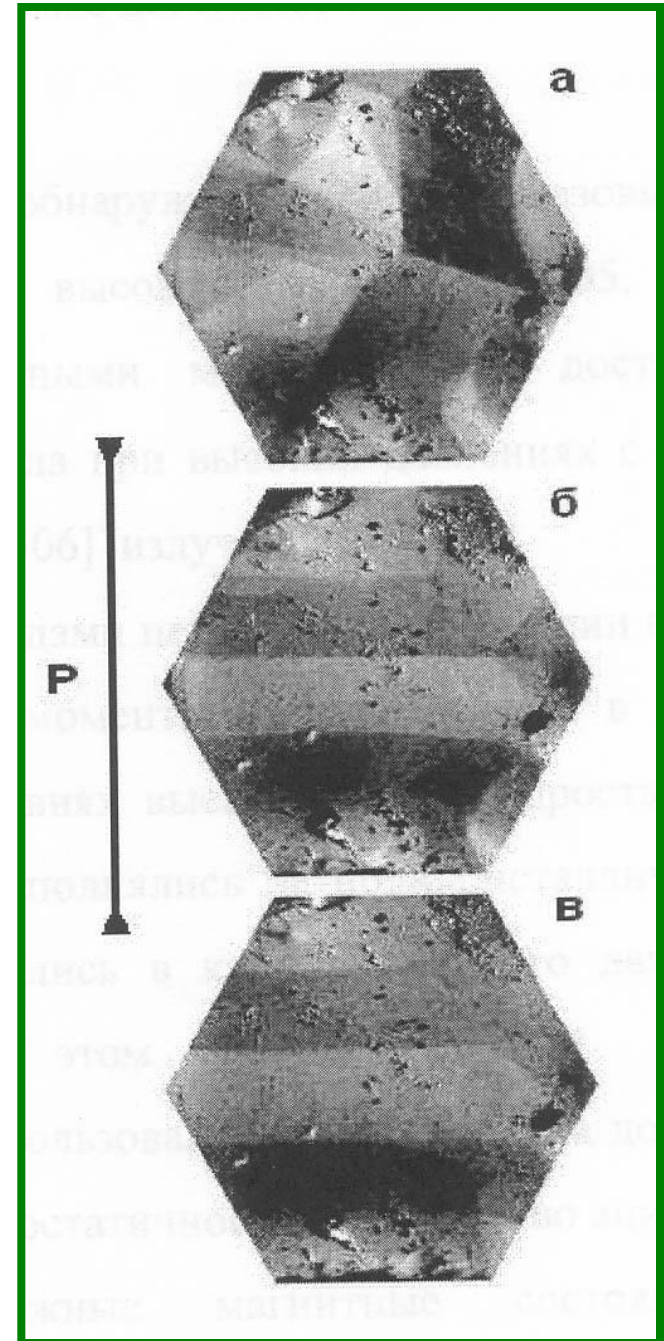
**Добротность  
магнитооптических  
материалов:  
ортоферрит иттрия,  
 $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$  ( $x=0$ ;  
1,03; 1,43) и бората  
железа**

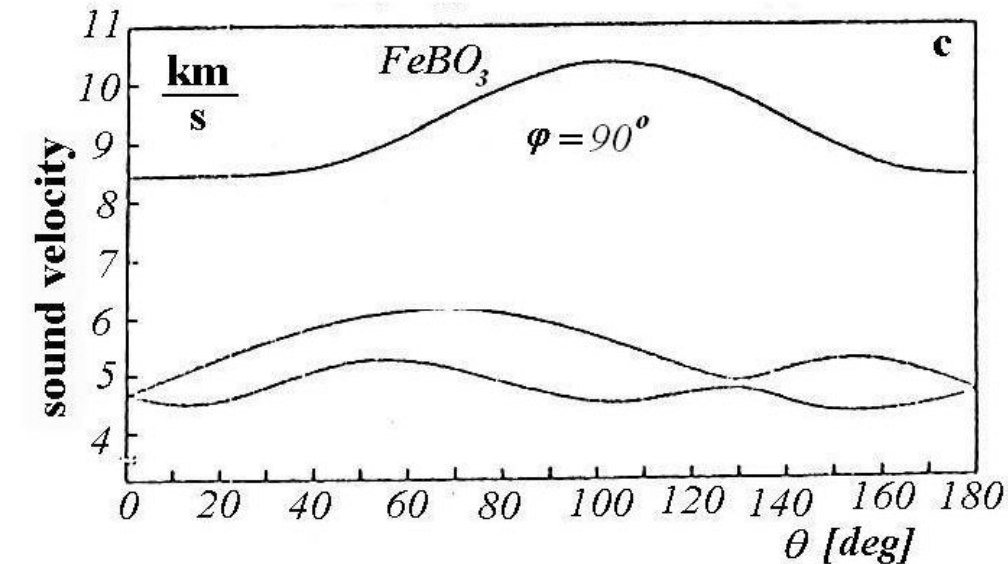
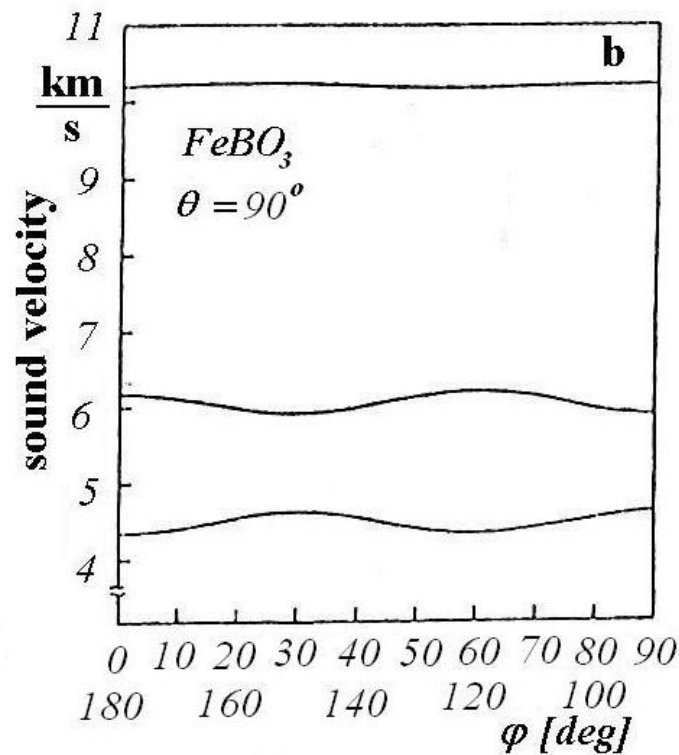
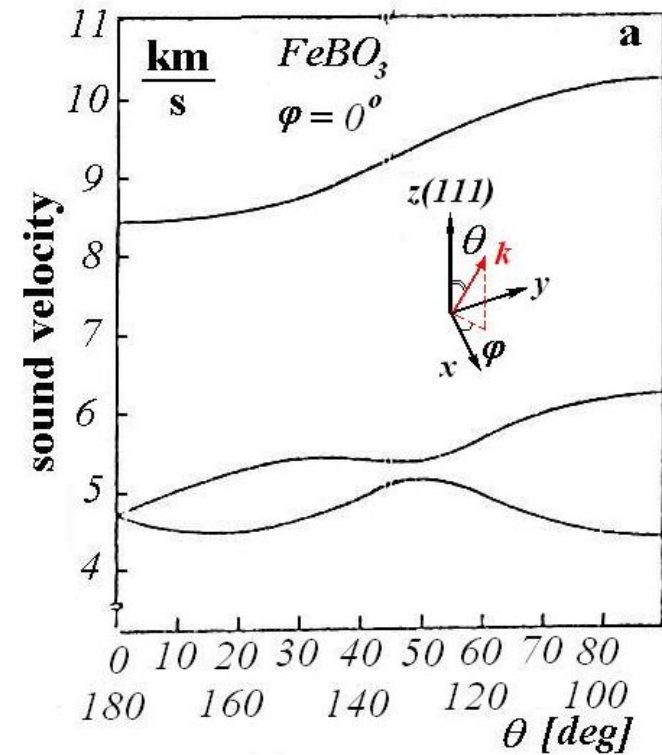
**Зависимость добротности бората  
железа от длины волны**



**Намагничивание  
кристалла бората  
железа: а)  $H=0,5$   
Э, б)  $H=1,7$  Э,  
в)  $H=2,3$  Э.**

**Влияние  
аксиального  
давления на  
доменную  
структуру ( $H=0$ ): а)  
 $p=0$ ,  
б)  $p=3,5 \cdot 10^7$  дин/см<sup>2</sup>  
(3,5 МПа)  
в)  $p=7 \cdot 10^7$  дин/см<sup>2</sup>.**

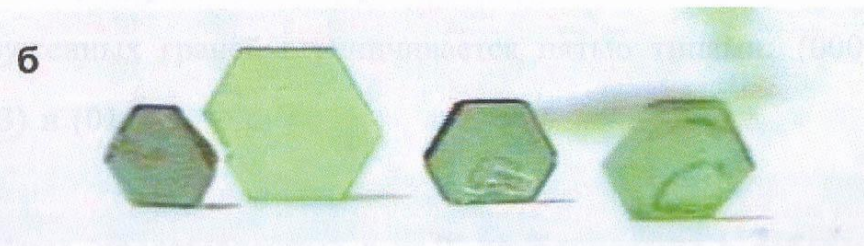
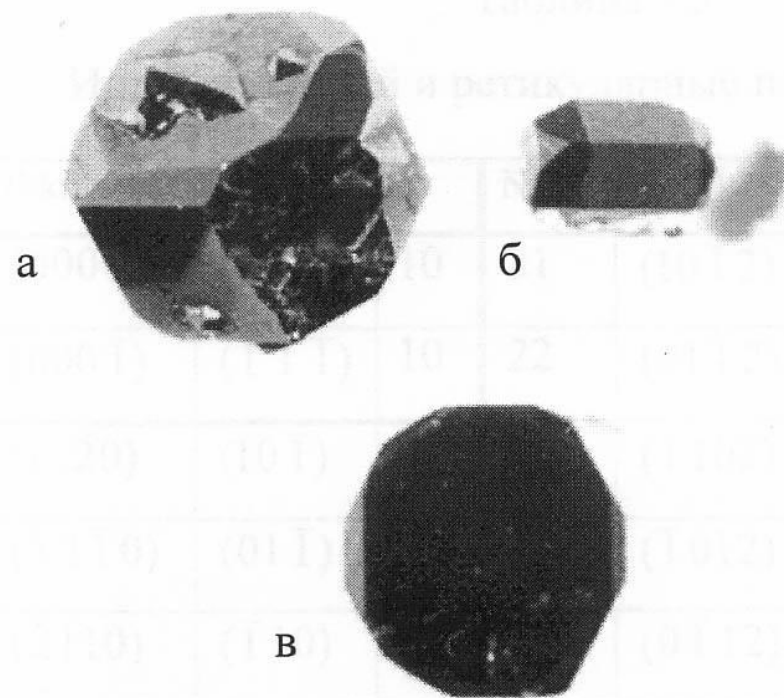
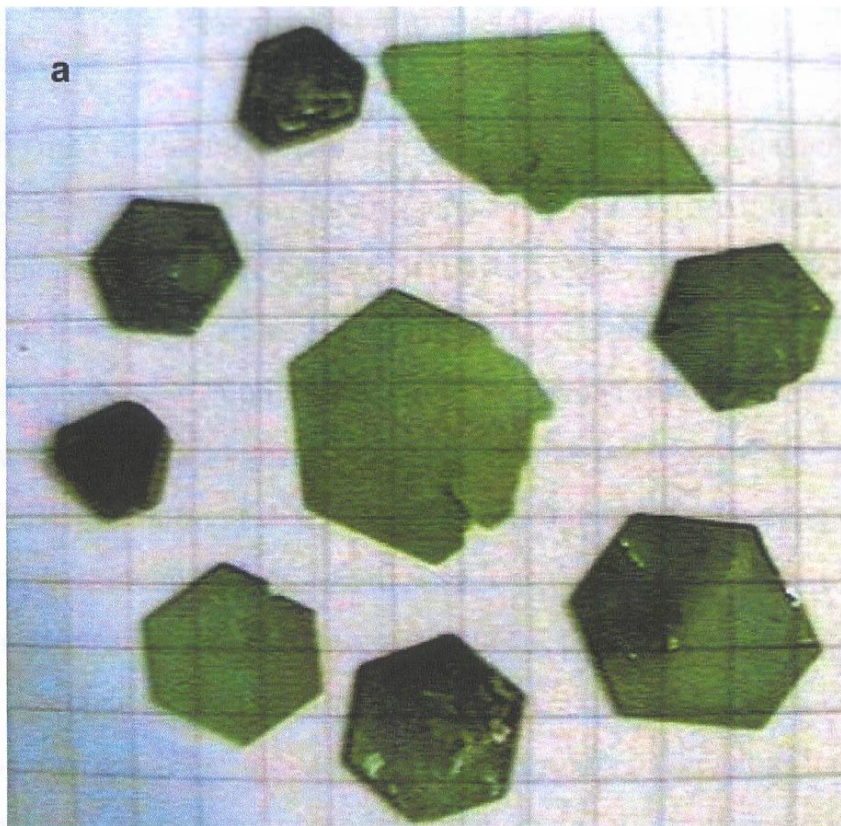




Diehl D., Jantz W.,  
 Nalang J.,  
 Wettling W.  
 Growth and  
 properties of iron  
 borate. Current  
 Topic in mater.  
 Sci., 1984, v.1, N  
 11, p. 1-370

**Угловые  
 зависимости  
 скорости звука в  
 борате железа,  
 вычисленные из  
 упругих констант**

**Монокристаллы бората железа в форме базисных пластин, выращенные из раствора в расплаве толщиной до 150 мкм. (Стругацкий М.Б. )**



**Кристаллы бората железа, синтезированные из газовой фазы**

# Магнитооптические материалы.

- Ортоферриты
  - Получение, магнитооптические свойства
- Борат железа
  - Получение, магнитооптические свойства

**Тензор магнитной  
восприимчивости**

**Оптика. Формулы  
Френеля**

**Продольные и  
поперечные  
эффекты**

## **Магнитооптика**

**Двулучепреломление**

**Оптика.  
Магнитооптические  
эффекты**

**МО  
добротность.  
МО материалы:  
ф-г, орт, б.ж.**

**Спектроскопия магнитных  
материалов**

**Место МО среди методов исследования магнитных  
свойств материалов**

**Методы исследования динамических процессов в  
магнетиках**



# Практикум: **сделанные** и **сданные** задачи.

Данные на 2 октября 2018

