

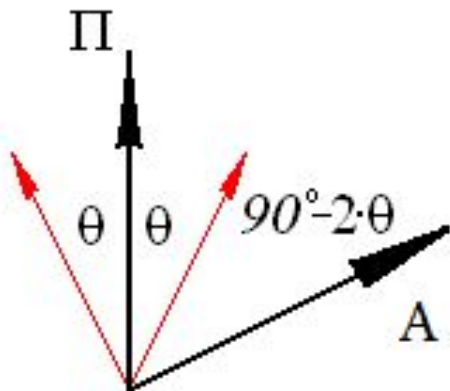
Двулучепреломление.

- Оптическая ось.
- Двулучепреломление.
- Двулучепреломление в одноосном кристалле.
- Линейно поляризованная волна в одноосном кристалле.
- Эллиптичность волны
- Случай изотропной среды

Магнитооптические материалы.

- Магнитооптическая добротность
- Пленки ферритов-гранатов.
 - ✓ Выращивание
 - ✓ Магнитооптические свойства
 - ✓ Эффект Фарадея в двухподрешеточном ферримагнетике
- Ортоферриты
- Борат железа

Магнитооптическая добротность



I – интенсивность света, прошедшего через пластинку толщиной z ,
 I_0 – интенсивность падающего света,
 α – коэффициент поглощения,
 φ – угол «падения».

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

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

θ_F – удельное фарадеевское вращения.

Выберем оптимальную толщину образца, чтобы интенсивность свет, проходящего через него, была максимальной.

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

$$\frac{\partial I}{\partial z} = 0$$

$$-\alpha \cdot \sin(2\theta_F z) + 4 \cdot \theta_F \cos(2\theta_F z) = 0$$

$$z = \frac{1}{2\theta_F} \operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot \theta_F}{\alpha} \right) \quad - \text{ оптимальная толщина образца}$$

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

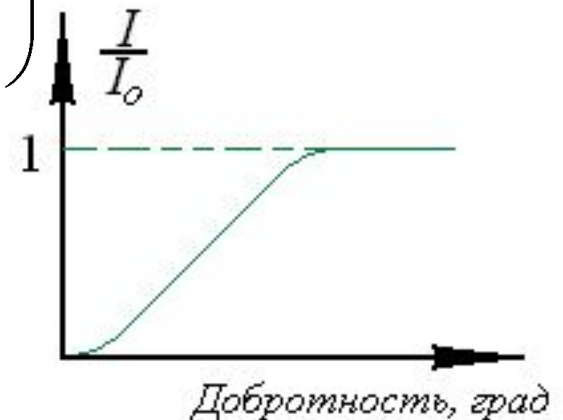
- магнитооптическая добротность

$$\left[\frac{\text{град} \cdot \text{см}}{\text{см}} = \text{град} \right]$$

Вычислим интенсивность света, прошедшего через образец при оптимальной толщине образца.

$$\begin{aligned} I &= I_o e^{-\alpha \cdot \frac{1}{2\theta_F} \arctg\left(\frac{4\cdot\theta_F}{\alpha}\right)} \sin^2\left(\cancel{2\theta_F} \cdot \frac{1}{\cancel{2\theta_F}} \arctg\left(\frac{4\cdot\theta_F}{\alpha}\right)\right) = \\ &= I_o e^{-\frac{\alpha}{2\theta_F} \arctg\left(\frac{4\cdot\theta_F}{\alpha}\right)} \sin^2\left(\arctg\left(\frac{4\cdot\theta_F}{\alpha}\right)\right) = \\ &= I_o e^{-\frac{\alpha}{2\theta_F} \arctg\left(\frac{4\cdot\theta_F}{\alpha}\right)} \frac{\frac{4\cdot\theta_F}{\alpha}}{1 + \left(\frac{4\cdot\theta_F}{\alpha}\right)^2} = f\left(\frac{2\cdot\theta_F}{\alpha}\right) \end{aligned}$$

Эта интенсивность – функция добротности



Прозрачные ферромагнетики: ферриты-гранаты, ортоферриты и борат железа.

Нельсон и Дирборн [Neilson J.W., Dearborn E.F. Physics Chem. Solids, 5, 202 (1958)] вырастили монокристаллы непроводящего железоиттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$.

Примерно в то же время были выращены кристаллы ортоферрита иттрия $YFeO_3$.

Борат железа $FeVO_3$ известен с 1963 г. Свойства исследованы в 1975.

Эти материалы прозрачные в видимой и ИК области спектра и обладают большим удельным фарадеевским вращением.

Ферриты-гранаты

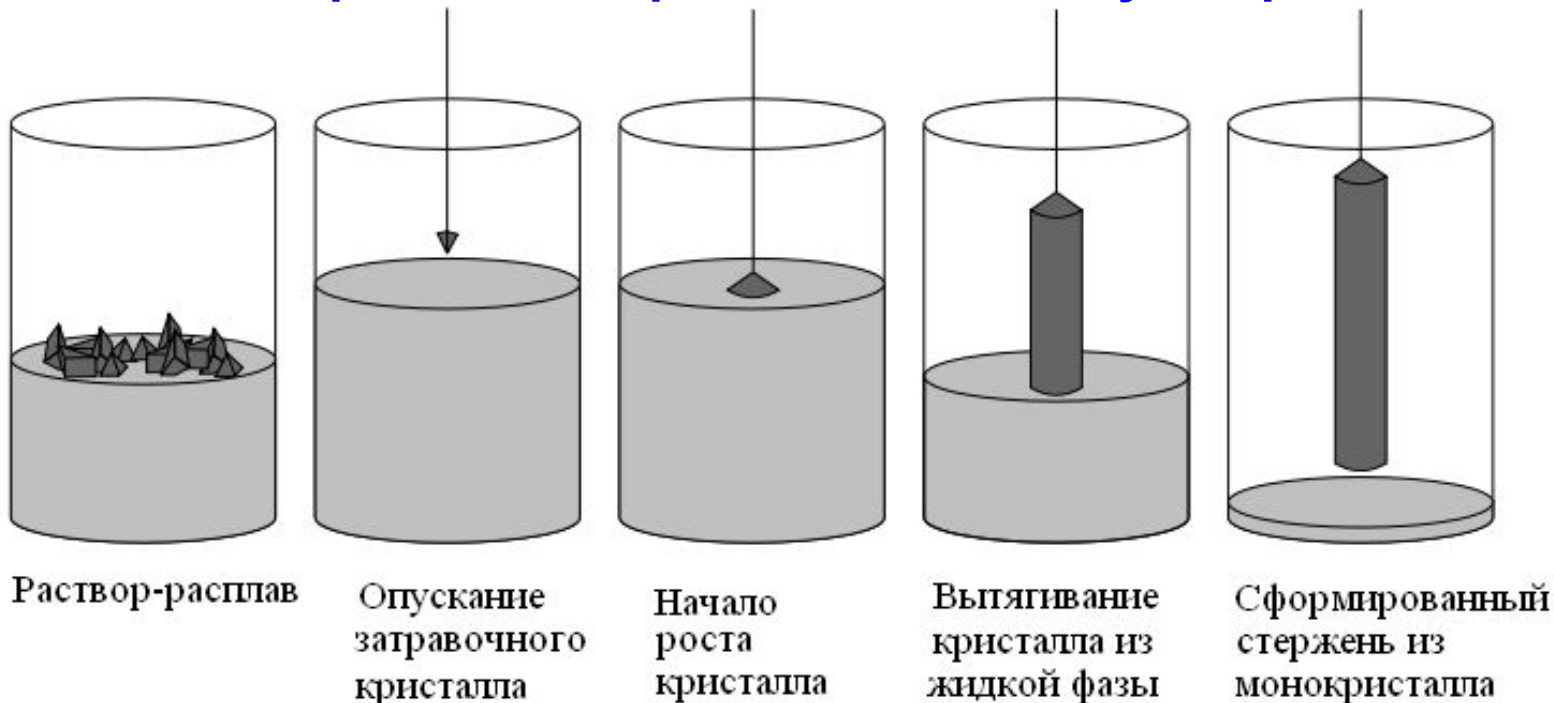
Технология изготовления ЦМД чипа

- ✓ Выращивание кристаллов немагнитных гранатов для подложек
- ✓ Изготовление самих подложек из массивных кристаллов
- ✓ Выращивание магнитных цмд пленок на подложках
- ✓ Обработка цмд пленок (например, ионная имплантация для подавления жестких цмд)
- ✓ Создание управляющих структур на цмд пленке
- ✓ Разрезание полученных пластин на одиночные приборные чипы.

Выращивание подложек

(немагнитная и монокристаллическая, твердая, плоская, гладкая, бездефектная, обладать малой электропроводностью и большой теплоемкостью, постоянная решетки подложки должна быть близка к постоянной решетки пленки)

Выращивание монокристаллов гранатов по методу Чохральского



**Скорость роста 0,8 – 1,5 см/ч,
температура раствора-расплава 1700 С,
скорость вращения 20-25 об/мин.**

на вращающемся
стержне



Ян Чохра́льский
(1885 — 1953) —
польский химик,
изобретатель широко
известного в настоящее
время метода
выращивания
монокристаллов из
расплава путём
вытягивания их вверх от
свободной поверхности,
названного впоследствии
его именем.

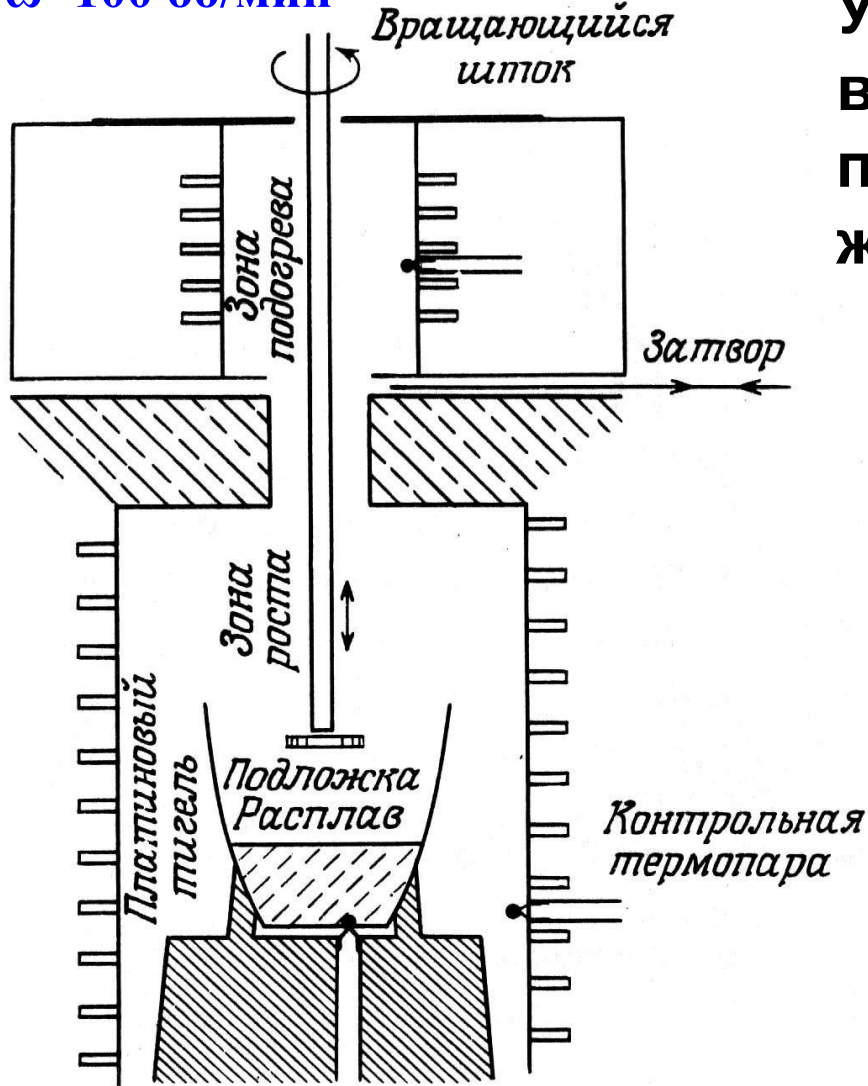
Подготовка подложки.

Для получения из монокристаллической булы законченной подложки необходимо выполнить операции:

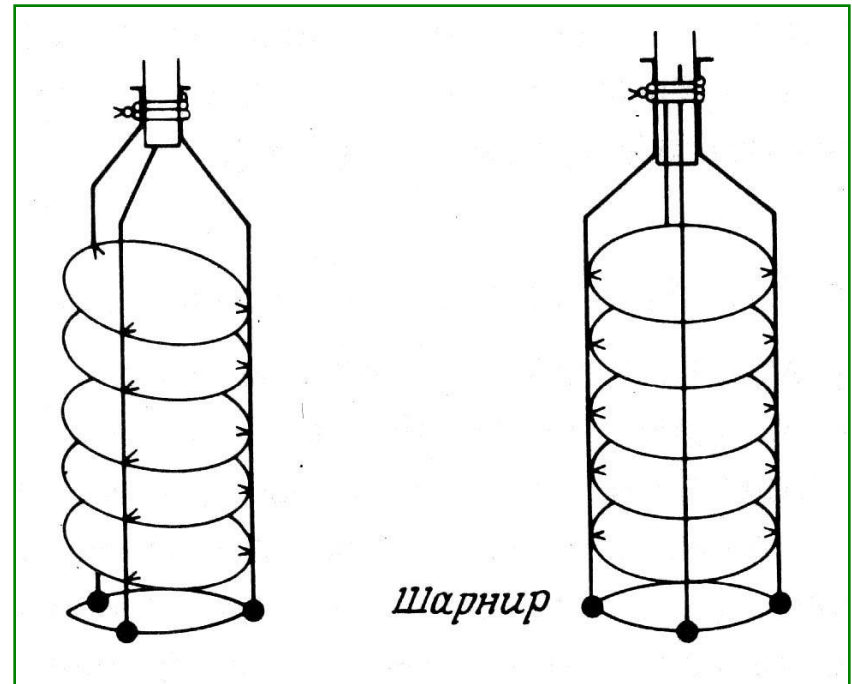
- С помощью оптического контроля определить ориентацию
- Разрезать булу на пластинки
- Отполировать их поверхность: сначала механически, а потом химически (горячей фосфористой кислотой). При полировке снимается около 120 мкм.

Выращивание пленок.

$\omega=100$ об/мин



Установка для выращивания гранатовых пленок методом жидкофазной эпитаксии



Держатели подложек для выращивания гранатовых пленок

Скорость роста 1 – 3 мкм/мин

Установка по выращиванию монокристаллов по методу Чохральского (НПО «Карат», Львов, Украина)



Кристаллическая
буля
 $\text{Cd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$
направление
выращивания
[111]

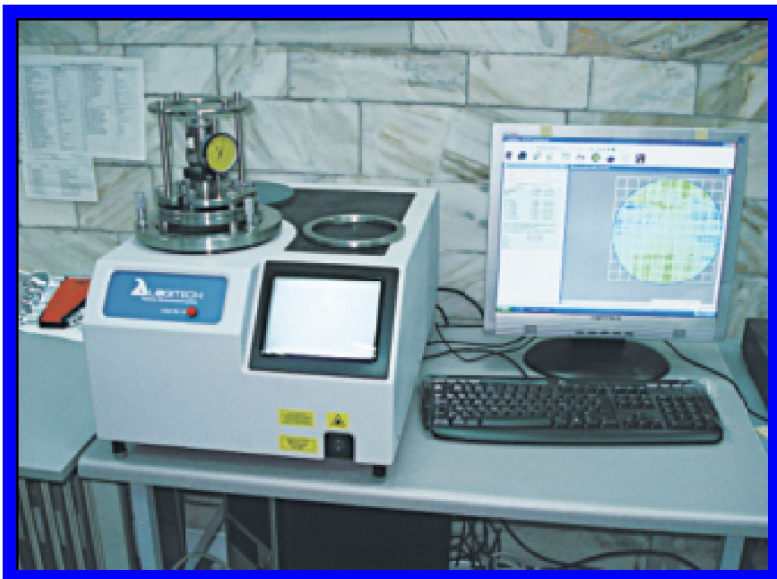
Станок прецизионной резки монокристаллических материалов



Технологическая линия
шлифовально-
полировальных станков



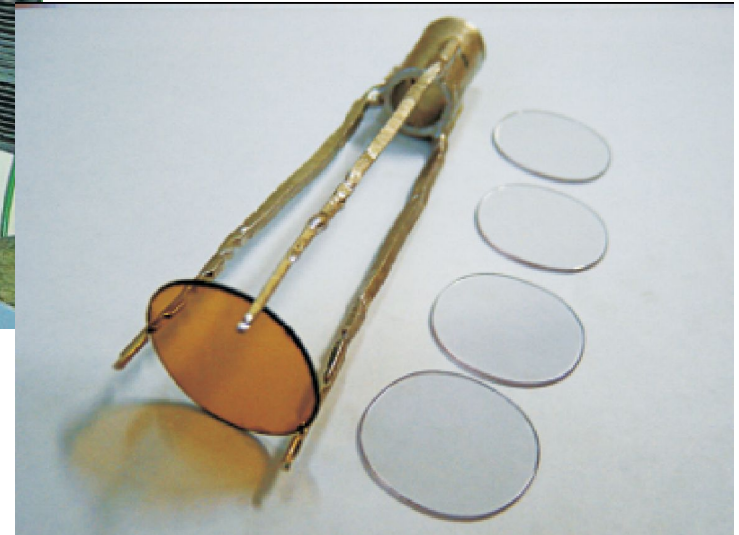
Лазерный интерферометр
для контроля качества
обработки рабочих
поверхностей
монокристаллических
оптических элементов



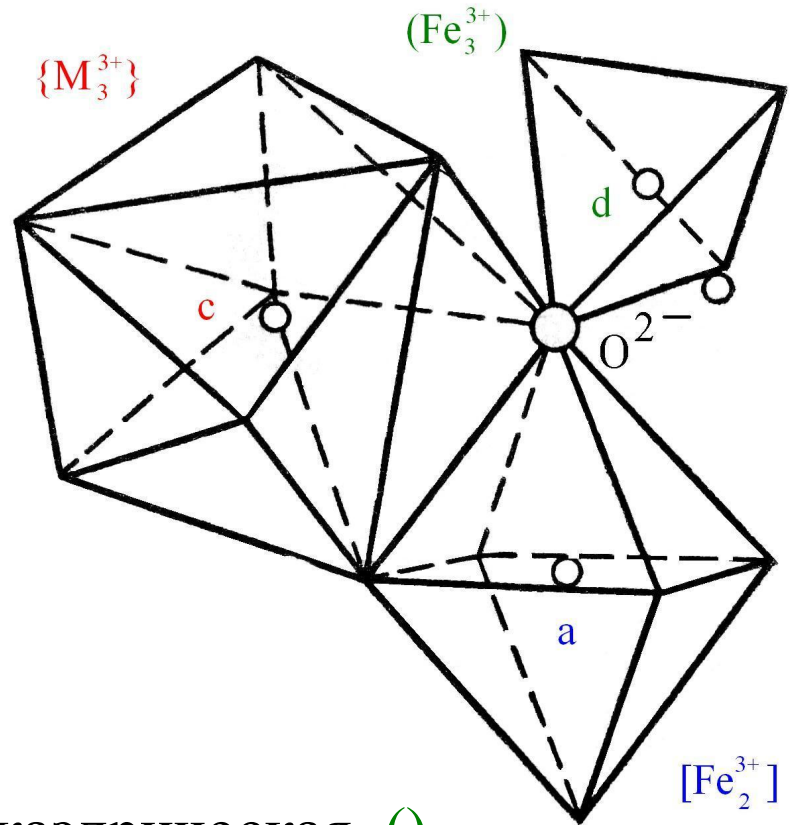
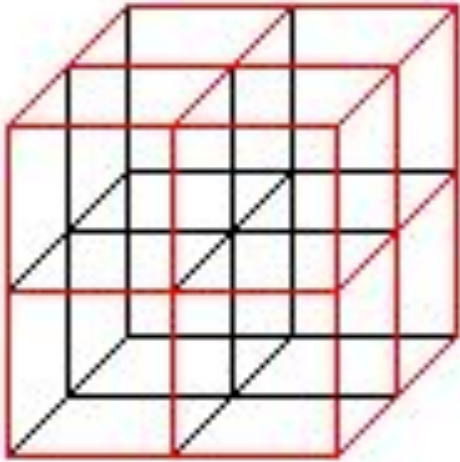
Установка для выращивания монокристаллических слоев методом жидкофазной эпитаксии



Эпитаксиальные пленки на подложке из гадилиний-галлиевого граната



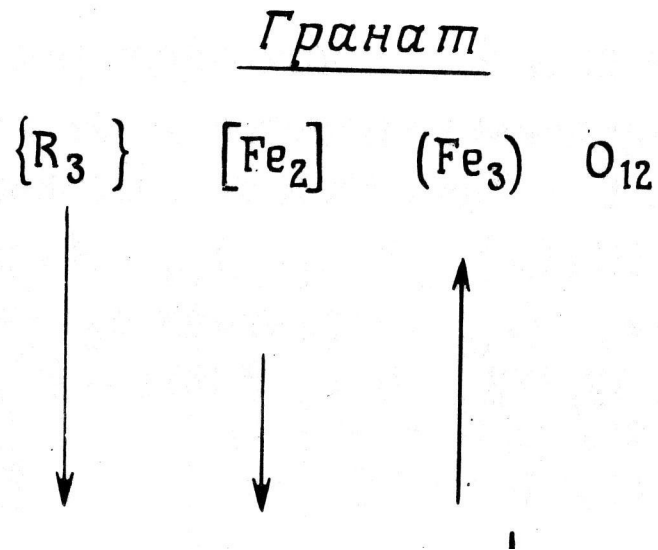
Ферриты-гранаты



$\{M_3^{3+}\}(Fe_3^{3+})[Fe_2^{3+}]O_{12}$; $\{\}$ – додекаэдрическая, $()$ – тетраэдрическая и $[\]$ – октаэдрическая подрешетки.

Ферриты-гранаты $M_3Fe_5O_{12}$, M – трехвалентный ион $Y, Cd, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Yb, Sm, Eu, Tb$. Кристаллическая структура изоморфна структуре граната $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$. В элементарной ячейке граната содержится 8 формульных единиц.

Ферриты-гранаты.



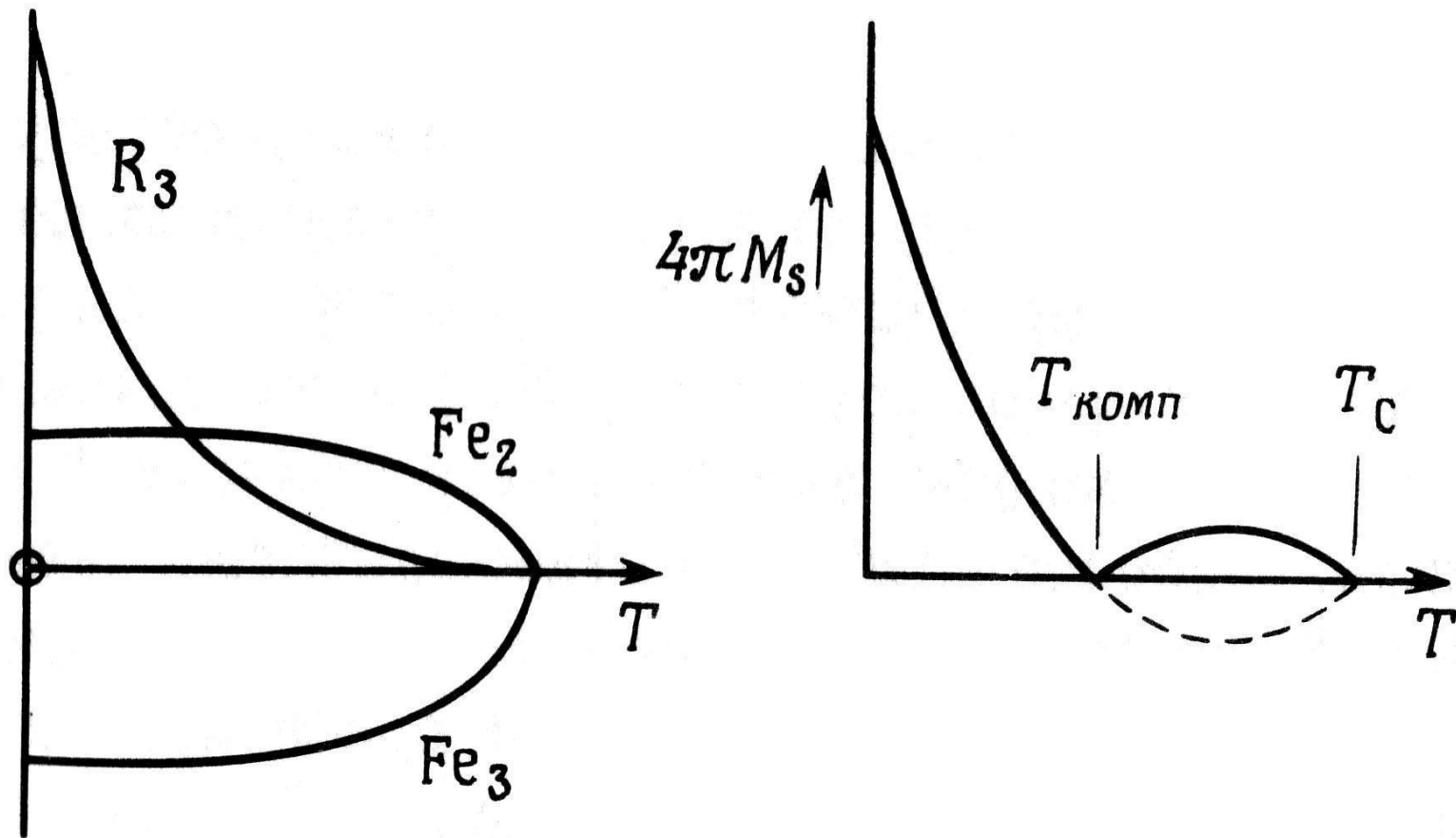
- Сильновзаимодействующие подрешетки железа можно считать единой подрешеткой. Следовательно в первом приближении магнитную структуру граната можно считать **двухподрешеточной**.
- Точка Нееля редкоземельных ферритов-гранатов практически не зависит от входящих в них редкоземельных ионов ($T_N = 563 \pm 15^\circ \text{ K}$).

Размер доменов от 0,1 до 10^3 мкм;

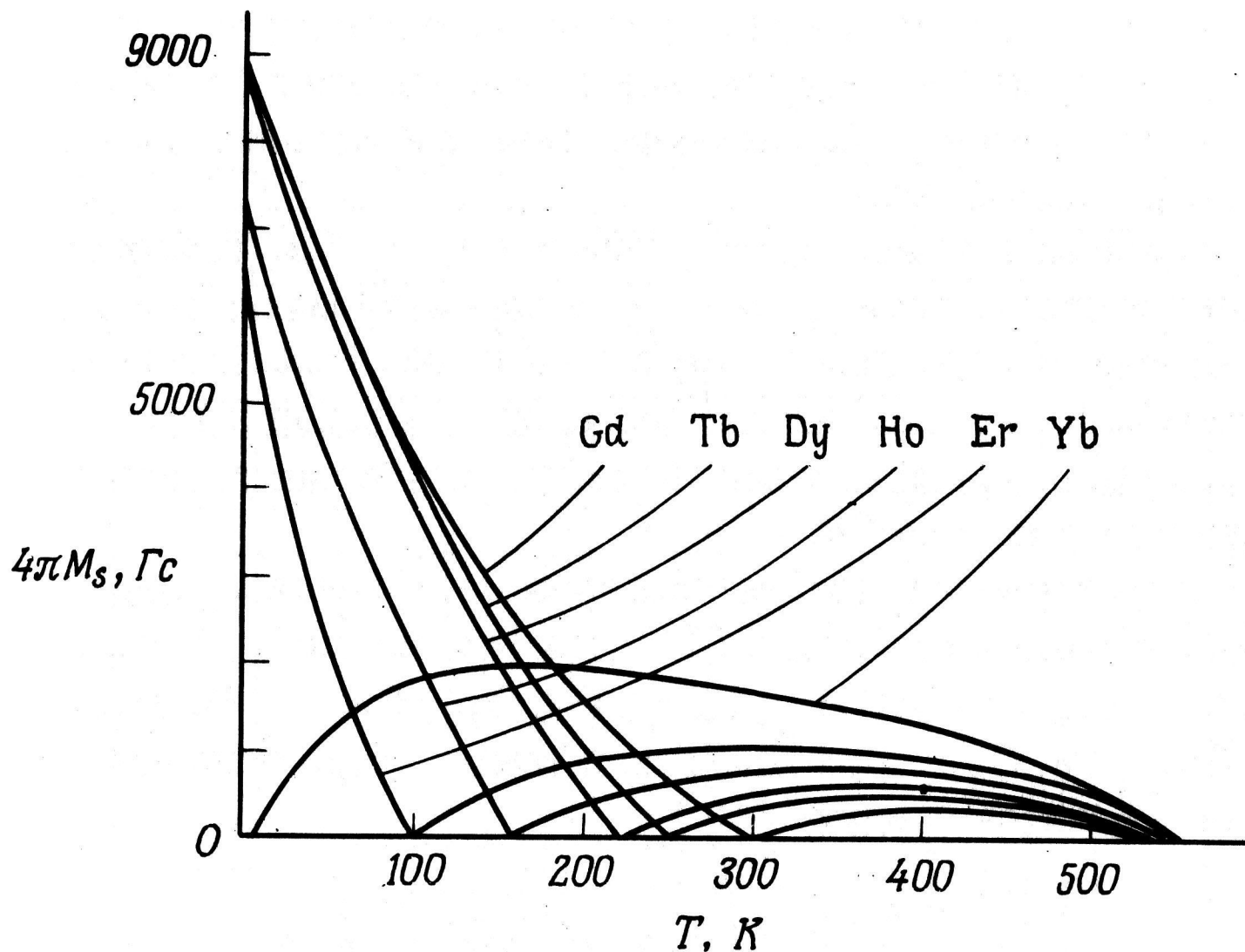
Намагниченность насыщения до $2 \cdot 10^3$ Гс;

Константа одноосной анизотропии от 10^{-3} до 10^5 эрг/см³;

Параметр затухания Гильберта от 10^{-4} до 1.



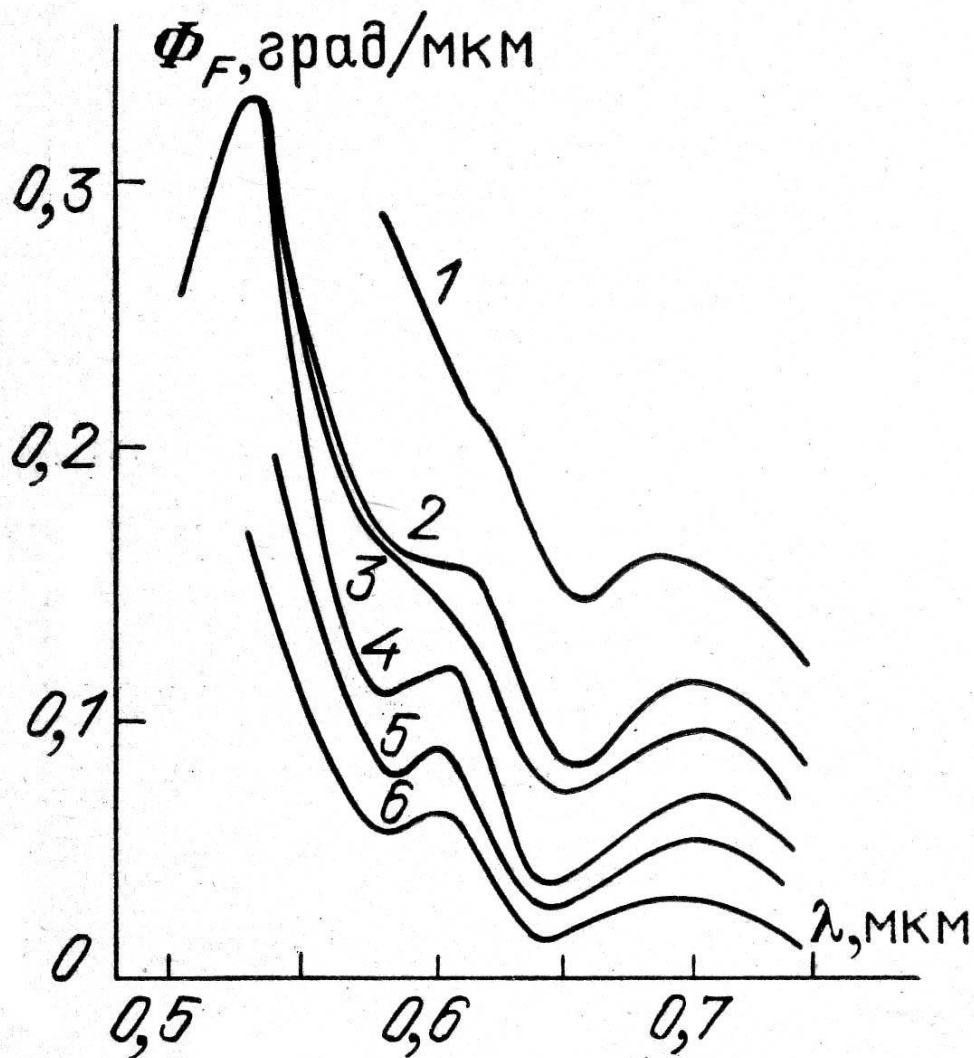
Температурная зависимость парциальных и результирующей намагниченностей в случае, когда существует температура компенсации.



Температурная зависимость намагниченностей некоторых редкоземельных ферритов-гранатов.

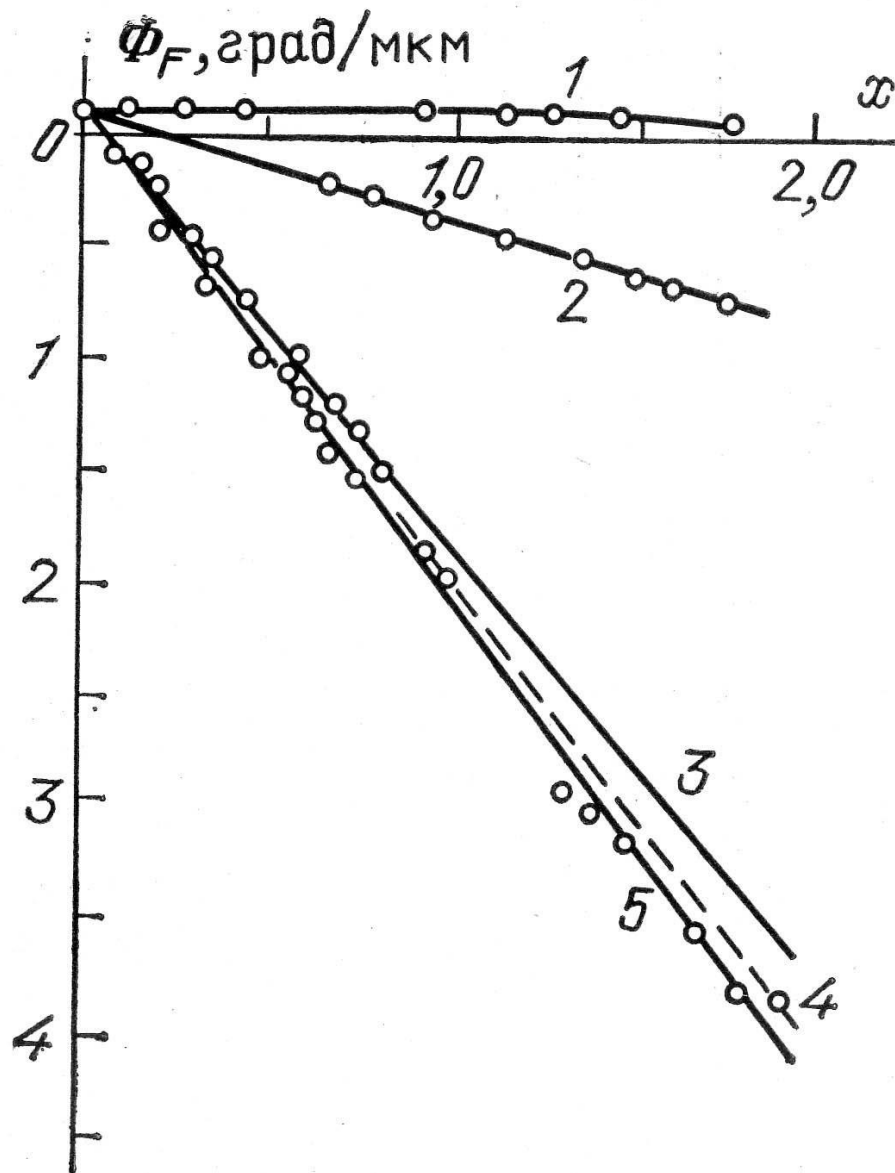
Основные механизмы вращения плоскости поляризации света в ферритах-гранатах. ($R_3Fe_5O_{12}$)

- Гиромагнитный, связан с ферромагнитным и обменным резонансами, собственные частоты которых лежат в далекой ИК области;
- Гироэлектрический обменный, связан с обменным расщеплением энергетических уровней редкоземельных ионов;
- Гироэлектрический спин-орбитальный, связан со спин-орбитальным расщеплением энергетических уровней ионов железа;
- Гироэлектрический, связан с интенсивными электронными переходами в редкоземельных ионах, собственные частоты которых расположены в УФ области спектра.

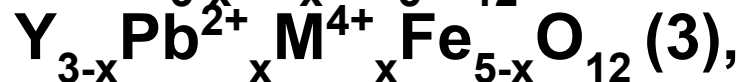


Дисперсия эффекта
Фарадея в
редкоземельных
ферритах-гранатах

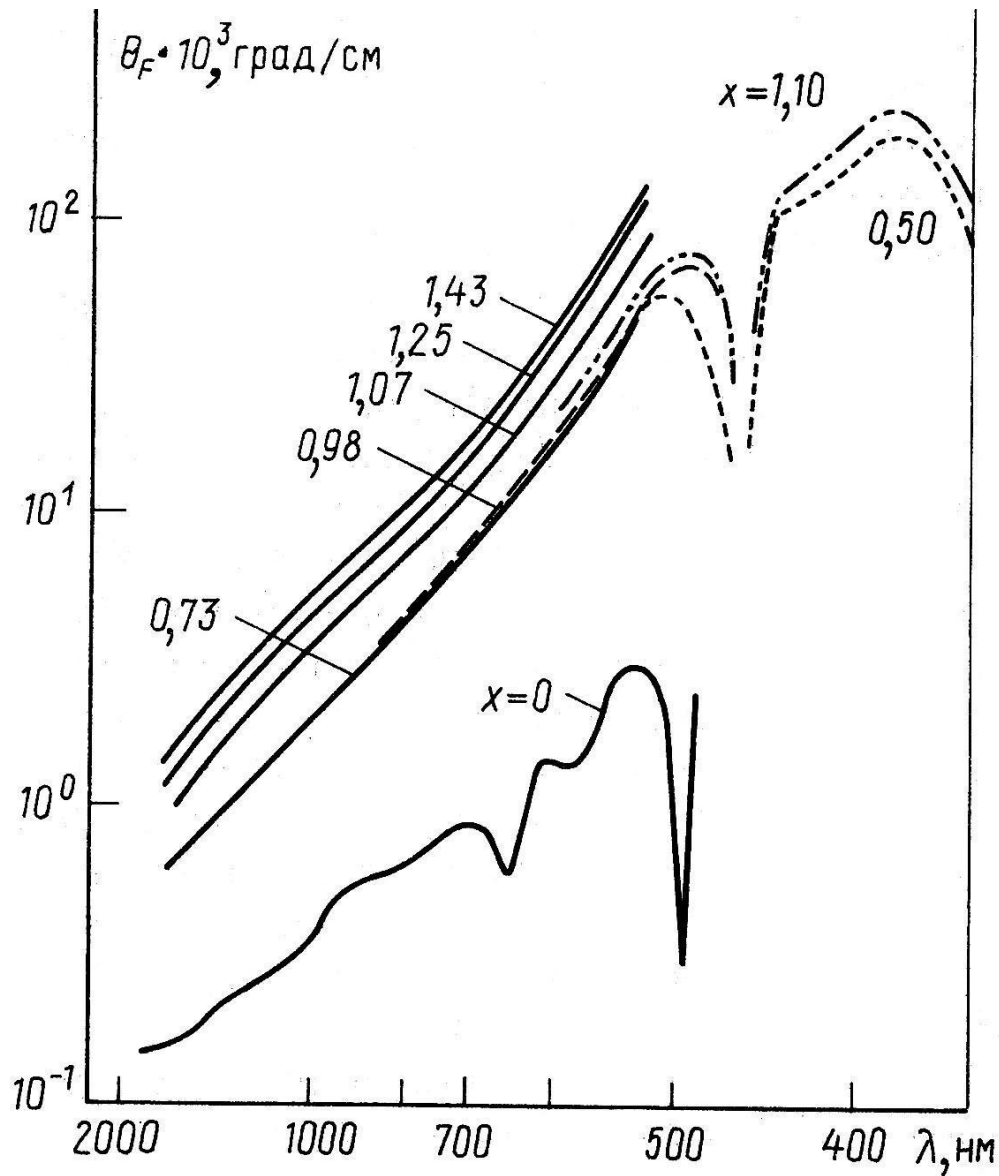
$R_3Fe_5O_{12}$:
 R= Tb(1)65;
 Gd (2)64;
 Dy (3)66;
 Y (4)39;
 Eu (5)63;
 Er (6)68.



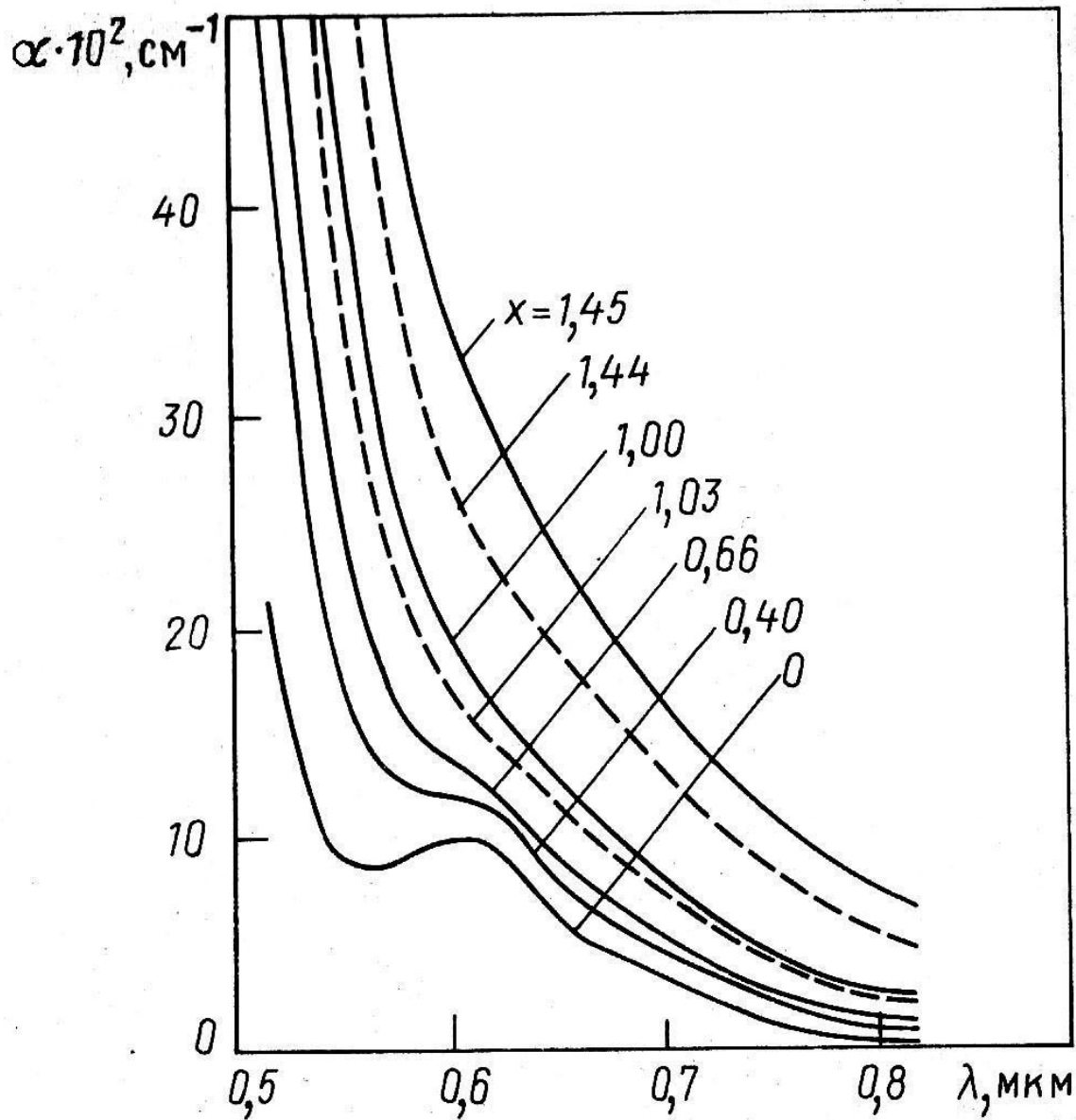
Концентрационная
зависимость эффекта
Фарадея в пленках
состава



$\lambda=0,63$ мкм.



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



**Спектры
поглощения
системы
 $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с
различным
содержанием
висмута.**

$$I = I_0 e^{-\alpha \cdot z}$$

I_0, I - интенсивность
падающего и
прошедшего
света

Ферриты-гранаты

- В первом приближении магнитную структуру граната можно считать двухподрешеточной.
- Магнитные свойства изменяются в широком диапазоне.
- Материалы удобные для магнитооптических исследований.

Эффект Фарадея в двухподрешеточном ферритмагнетике

$$\begin{cases} \frac{d\vec{M}_1}{dt} = \gamma_1 \left[(\vec{H} + \vec{H}_1^{обм}) \times \vec{M}_1 \right] \\ \frac{d\vec{M}_2}{dt} = \gamma_2 \left[(\vec{H} + \vec{H}_2^{обм}) \times \vec{M}_2 \right] \end{cases}$$

В состоянии равновесия M_1 и M_2 ориентированы антипараллельно, и вектор намагниченности

$$\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$$

при насыщении направлен параллельно магнитному полю H

$$\vec{H}_1^{обм} = v_{11} \vec{M}_1 + v_{12} \vec{M}_2$$

$$\vec{H}_2^{обм} = v_{21} \vec{M}_1 + v_{22} \vec{M}_2$$

$$[v] = \begin{vmatrix} 0 & -v \\ v & 0 \end{vmatrix}$$

обменные константы

С учетом вида тензора ν

$$\overrightarrow{H}_1^{обм} = -\nu \overrightarrow{M}_2$$

$$\overrightarrow{H}_2^{обм} = \nu \overrightarrow{M}_1$$

Уравнения Ландау-Лифшица имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d\overrightarrow{M}_1}{dt} = \gamma_1 [\overrightarrow{H} \times \overrightarrow{M}_1] + \gamma_1 [\overrightarrow{H}_1^{обм} \times \overrightarrow{M}_1] \\ \frac{d\overrightarrow{M}_2}{dt} = \gamma_2 [\overrightarrow{H} \times \overrightarrow{M}_2] + \gamma_2 [\overrightarrow{H}_2^{обм} \times \overrightarrow{M}_2] \end{cases}$$

Эти уравнения описывают прецессию векторов M_1 и M_2 , связанных друг с другом обменным взаимодействием, которое характеризуется константой обменного поля ν .

$$\begin{cases} \frac{d\overrightarrow{M}_1}{dt} = \gamma_1 [\overrightarrow{H} \times \overrightarrow{M}_1] - \gamma_1 \nu [\overrightarrow{M}_2 \times \overrightarrow{M}_1] \\ \frac{d\overrightarrow{M}_2}{dt} = \gamma_2 [\overrightarrow{H} \times \overrightarrow{M}_2] + \gamma_2 \nu [\overrightarrow{M}_1 \times \overrightarrow{M}_2] \end{cases}$$

Найдем собственные частоты этой системы, т.е. частоты, с которыми вектора M_1 и M_2 могут совершать когерентное прецессионное движение вокруг положения равновесия.

Разложим M_1 и M_2 на статические и динамические составляющие

$$\vec{M}_{1,2} = \vec{M}_{1,2}^o + \vec{m}_{1,2}$$

При этом и $\left| \vec{M}_{1,2}^o \right| \gg \left| \vec{m}_{1,2} \right|$ $m_{1,2} \approx e^{i\omega t}$

Если ось z параллельна полю H и $M_{1,2}^o$, то из-за симметрии системы относительно этой оси, обе динамические составляющие должны обладать круговой поляризацией в плоскости xu . Поэтому для них справедливы соотношения:

$$m_{(1,2)x} = m_{(1,2)} e^{i\omega t}$$

$$m_{(1,2)y} = -im_{(1,2)x} = -im_{(1,2)} e^{i\omega t}$$

Направления вращения векторов m_1 и m_2 одинаковы и определяются знаком ω .

Подставляя векторы M_1 и M_2 в виде сумм динамических и статических слагаемых, проектируя уравнения на оси координат, получим уравнения для амплитуд

Запишем уравнения системы

$$\frac{d}{dt} \begin{vmatrix} m_1 e^{i\omega t} \\ -im_1 e^{i\omega t} \\ M_1^o \end{vmatrix} = \gamma_1 \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & H \\ m_1 e^{i\omega t} & -im_1 e^{i\omega t} & M_1^o \end{vmatrix} - \gamma_1 \nu \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ -im_2 e^{i\omega t} & -im_2 e^{i\omega t} & M_2^o \\ m_1 e^{i\omega t} & -im_1 e^{i\omega t} & M_1^o \end{vmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{vmatrix} m_2 e^{i\omega t} \\ -im_2 e^{i\omega t} \\ M_2^o \end{vmatrix} = \gamma_2 \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & H \\ m_2 e^{i\omega t} & -im_2 e^{i\omega t} & M_2^o \end{vmatrix} + \gamma_2 \nu \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ m_1 e^{i\omega t} & -im_1 e^{i\omega t} & M_1^o \\ m_2 e^{i\omega t} & -im_2 e^{i\omega t} & M_2^o \end{vmatrix}$$

Уравнение для x компонент первого и второго уравнений:

$$i\omega m_1 e^{i\omega t} = \gamma_1 (im_1 H e^{i\omega t}) - \gamma_1 \nu (-im_2 M_1^o e^{i\omega t} + im_1 M_2^o e^{i\omega t})$$

$$i\omega m_2 e^{i\omega t} = \gamma_2 (im_2 H e^{i\omega t}) + \gamma_2 \nu (-im_1 M_2^o e^{i\omega t} + im_2 M_1^o e^{i\omega t})$$

Сгруппируем по m_1 и m_2 :

$$\begin{cases} m_1(\omega - \gamma_1 H + \gamma_1 v M_2^o) - \gamma_1 v M_1^o m_2 = 0 \\ \gamma_2 v M_2^o m_1 + m_2(\omega - \gamma_2 H - \gamma_2 v M_1^o) = 0 \end{cases} \quad M_{1,2}^o \approx M_{1,2}$$

Где $M_{1,2} = \left| \overrightarrow{M_{1,2}} \right|$ и $M_1 > M_2$

Однородная система уравнений имеет решение, если ее определитель равен нулю.

$$(\omega - \gamma_1 H + \gamma_1 v M_2)(\omega - \gamma_2 H - \gamma_2 v M_1) + \gamma_1 \gamma_2 v^2 M_1 M_2 = 0$$

$$\omega^2 - \omega(H(\gamma_1 + \gamma_2) + v(\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2)) + \gamma_1 \gamma_2 H^2 + \\ - H v \gamma_1 \gamma_2 (M_1 - M_2) = 0$$

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{2} [H(\gamma_1 + \gamma_2) + v(\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2) \pm \{H^2(\gamma_2 - \gamma_1)^2 + 2Hv(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 M_2 + \gamma_2 M_1) + v^2(\gamma_1 M_2 - \gamma_2 M_1)^2\}^{0,5}]$$

Обменные поля составляют порядка $10^5 - 10^7$ Э и, следовательно,

$$\text{как правило } H < v(M_1 - M_2)$$

Преобразуем выражения $\omega_{1,2}$ для

Пренебрежем первым слагаемым под корнем и разложим в ряд.

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{2} \left[H(\gamma_1 + \gamma_2) + v(\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2) \left\{ 1 \pm 1 \pm \frac{H(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 M_2 + \gamma_2 M_1)}{v(\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2)^2} \right\} \right]$$

Рассмотрим «высокую» и «низкую» частоты

«Высокая» частота

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \left[\cancel{H(\gamma_1 + \gamma_2)} + \nu(\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2) \left\{ 2 + \frac{H(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 M_2 + \gamma_2 M_1)}{\nu(\gamma_1 M_2 - \gamma_2 M_1)^2} \right\} \right]$$

Пренебрежем слагаемыми с Н

$$\omega_1 = \frac{1}{2} [2\nu(\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2)] = \nu(\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2)$$

Эта частота определяется эффективным обменным полем – частота обменного резонанса.

$$\omega_1 = \omega_{обм}$$

Лежит в далекой ИК области.

«Низкая» частота

$$\begin{aligned}\omega_2 &= \frac{1}{2} \left[H(\gamma_1 + \gamma_2) - \cancel{\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2} \left\{ \frac{H(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 M_2 + \gamma_2 M_1)}{\cancel{\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2}^2} \right\} \right] = \\ &= \frac{H}{2} \left[\frac{2\gamma_1\gamma_2 M_1 - 2\gamma_1\gamma_2 M_2}{\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2} \right] = \frac{\cancel{2}H\gamma_1\gamma_2}{\cancel{2}} \left[\frac{M_1 - M_2}{\gamma_2 M_1 - \gamma_1 M_2} \right] = \\ &= H \frac{M_1 - M_2}{\frac{M_1}{\gamma_1} - \frac{M_2}{\gamma_2}} = \gamma_{\text{эфф}} H = \omega_r\end{aligned}$$

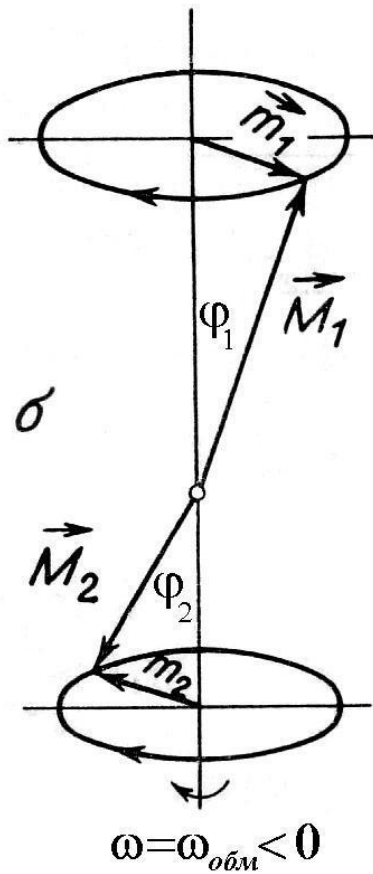
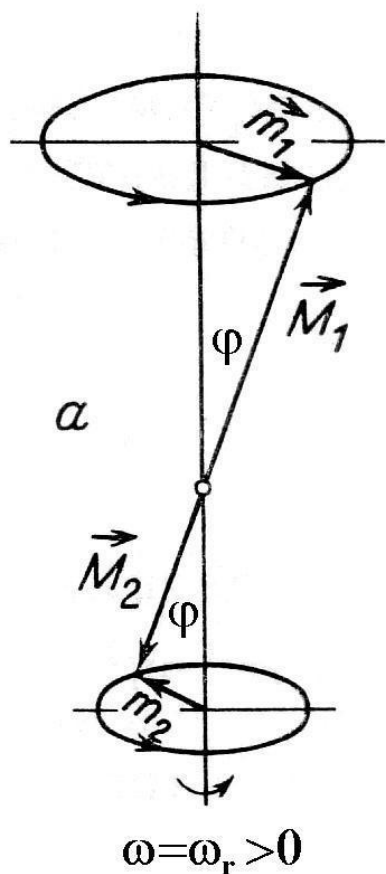
Частота ω_r не зависит от константы молекулярного поля и совпадает с обычной резонансной частотой ферромагнетика с гиромагнитным отношением $\gamma_{\text{эфф}}$.

$$\gamma_{\text{эфф}} = \frac{\frac{M_1}{\gamma_1} - \frac{M_2}{\gamma_2}}{\frac{M_1}{\gamma_1} - \frac{M_2}{\gamma_2}}$$

Величина $\gamma_{\text{эфф}}$ характеризует гиромагнитные свойства вещества как единой системы и имеет смысл только в том случае, когда вектора M_1 и M_2 параллельны. В случае, когда $\gamma_1 = \gamma_2$, ω_r — это частота ферромагнитного резонанса.

Эта частота находится в СВЧ области.

Типы прецессий в ферритмагнетике с двумя подрешетками $M_1 > M_2$:



Частоты ω_r и $\omega_{обм}$ имеют противоположные знаки, следовательно, соответствующие им прецессии происходят в противоположных направлениях.

Т.о. ферритмагнетик с двумя подрешетками имеет две различные собственные частоты. Одна из них совпадает с резонансной частотой ферромагнетика, а вторая является прямым следствием наличия подрешеток.

Если в уравнение Ландау-Лифшица добавить член, учитывающий высокочастотное поле, и решить его аналогично случаю ферромагнетика, то можно получить выражения для компонент тензора восприимчивости.

$$\theta_F = \frac{\gamma \sqrt{\epsilon\mu} M_0}{c}$$

Удельное фарадеевское вращение в ферромагнетике:

Аналогичный расчет для двухподрешеточного ферримагнетика при $\omega \gg \omega_r, \omega_{обм}$

$$\theta_F = \frac{\sqrt{\epsilon\mu} (\gamma_1 M_1 - \gamma_2 M_2)}{c}$$

Переписывая эту формулу в виде

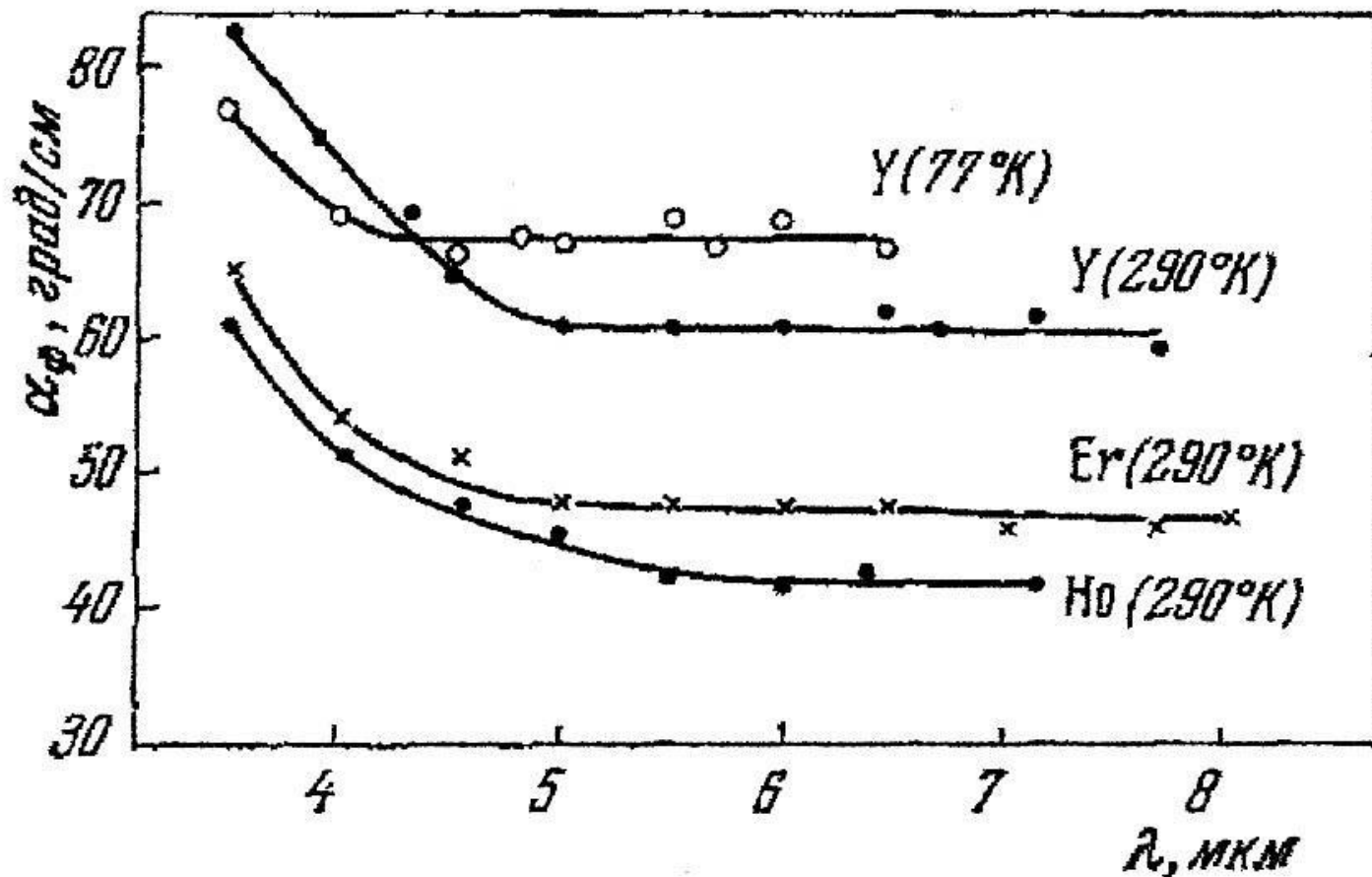
$$\theta_F = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{c} \left(\gamma_{эфф} M - \frac{\gamma_{эфф} M_1 M_2 (\gamma_1 - \gamma_2)^2}{\gamma_1 \gamma_2 M} \right)$$

$$M = M_1 - M_2$$

$$\gamma_{эфф} = \frac{M_1 - M_2}{\frac{M_1}{\gamma_1} - \frac{M_2}{\gamma_2}}$$

видно, что θ_F определяется вкладом как ферромагнитного (первое слагаемое), так и обменного резонансов.

Эффект Фарадея в ферритах-гранатах иттрия (Y), эрбия (Er) и гольмия (Ho) в инфракрасной области спектра при $T=290^{\circ}\text{K}$ и в феррите-гранате иттрия при $T=77^{\circ}\text{K}$



Частотно-независимый эффект Фарадея – следствие магнитной восприимчивости на оптических частотах.

Магнитооптические материалы.

- Магнитооптическая добротность
- Пленки ферритов-гранатов.
 - ✓ Выращивание
 - ✓ Магнитооптические свойства
 - ✓ Эффект Фарадея в двухподрешеточном ферримагнетике
- Ортоферриты
- Борат железа