

# Сентябрь

**Пн**

**Вт**

**Ср**

**Чт**

**Пт**

**Сб**

**Вс**

**3**

**4**

**5**

**6**

**7**

**1**

**2**

**8**

**9**

**10**

**11**

**12**

**13**

**14**

**15**

**16**

**17**

**18**

**19**

**20**

**21**

**22**

**23**

**24**

**25**

**26**

**27**

**28**

**29**

**30**

# Октябрь

Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

# Магнитооптика ферромагнетиков

## Литература:

- Р. Уайт. Квантовая теория магнетизма. Мир. 1985.
- Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Наука 1992.
- Г.С. Кринчик, М.В.Четкин. Прозрачные ферромагнетики, УФН, 98, с.3-25, 1969.
- Г.С.Кринчик. Физика магнитных явлений. Изд-во МГУ. 1985.
- В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов, М.В. Четкин. Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках. УФН, т.146, с.417-458, 1985.
- V.G. Bar'jakhtar, M.V. Chetkin, B.A. Ivanov, S.N. Gadetskiy, *Dynamics of Topological Magnetic Solitons*. (Springer tracts in modern physics, Berlin), vol. **129**, 1994.
- А.К. Звездин, В.А.Котов. Магнитооптика тонких пленок. Наука. 1988.
- М.А. Шамсутдинов, И.Ю.Ломакина, В.Н.Назаров, А.Т.Харисов. Ферро- и антиферродинамика. Наука. 2009.

# История

1. Древний мир (до 7 века).
  2. Средние века (7 век – середина 17 века).
  3. Новое время (середина 17 в – начало 20 в).
- ✓ Становление современного магнетизма
4. Новейшее время (20 – 21 в).
- ✓ История магнитооптики.
  - ✓ Магнитооптика на кафедре магнетизма МГУ.

# Развитие магнетизма в древнем мире.

Изучение природных явлений,  
их описание и попытки  
объяснений, экспериментов как  
таковых нет.

# Средние века и начало нового времени

Появляются измерительные приборы, проводятся первые эксперименты. Магнетизм почти не развивается (нет потребности), экспериментальная база слабая.

# Новое время



**Алессáндро Во́льта** (1745 — 1827)  
— итальянский физик, химик и физиолог, один из основоположников учения об электричестве.

В 1800 году изобрел первый химический источник электрического тока — гальваническую батарею (вольтов столб).

# Новое время



**Ханс Кристиан Эрстед**  
(1777 — 1851) — датский учёный, физик, исследователь явлений электромагнетизма.

В 1820 г. обнаружил взаимодействие магнитной стрелки и проводника с током.

# Новое время

**Андре́-Мари́ Ампе́р**  
(1775 — 1836).



Обнаружил взаимодействие токов. Создал первую теорию, которая выражала связь электрических и магнитных явлений. Амперу принадлежит гипотеза о природе магнетизма, он ввел в физику понятие «электрический ток».

# Новое время.

## Закон Био-Савара-Лапласа (1820)



**Жан-Батист Био**  
(1774 — 1862) —  
знаменитый  
французский ученый,  
член Парижской  
Академии наук

**Феликс Савар**  
(1791 — 1841) —  
французский  
физик.

**Пьер-Симон, маркиз де Лаплас** (1749 — 1827) —  
французский математик,  
физик и астроном, один  
из создателей теории  
вероятностей.

# Новое время



Майкл  
ФАРАДЕЙ  
(1791 -1867)

- ✓ Открыл электромагнитную индукцию, лежащую в основе современного промышленного производства электричества и многих его применений.
- ✓ Создал первую модель электродвигателя.
- ✓ Среди других его открытий — первый трансформатор, химическое действие тока, законы электролиза, диамагнетизм.
- ✓ Фарадей ввёл в научный обиход термины ион, катод, анод, электролит, диэлектрик, диамагнетизм, парамагнетизм
- ✓ **1845 г. открытие эффекта Фарадея**

# Новое время

**Джеймс Клерк Ма́ксвелл**  
(1831 — 1879).

Максвелл заложил основы современной классической электродинамики, ввёл в физику понятия тока смещения и электромагнитного поля, получил ряд следствий из своей теории (предсказание электромагнитных волн, электромагнитная природа света, давление света и другие).



Уравнения Максвелла были опубликованы в 1873 году «Трактате об электричестве и магнетизме».

# Новое время

- После создания гальванического элемента начинается активное развитие экспериментальной физики, в том числе и магнетизма.
- Развитие математического аппарата привело к развитию теории магнитных явлений

# История магнитооптики.

- ✓ Открытие магнитооптических эффектов.
- ✓ Гипотеза существования доменов.
- ✓ Магнитная запись
- ✓ Наблюдение доменов с помощью эффекта Керра.
- ✓ Появление новых материалов – прозрачные ферромагнитные диэлектрики. Активное использование магнитооптики для исследования их свойств и возможностей практического применения.
- ✓ Появление импульсных лазеров, развитие метода высокоскоростной фотографии для исследования динамических процессов в магнетиках.
- ✓ Появление мощных импульсных лазеров – проведение оптомагнитных экспериментов.

# Магнитооптические эффекты.

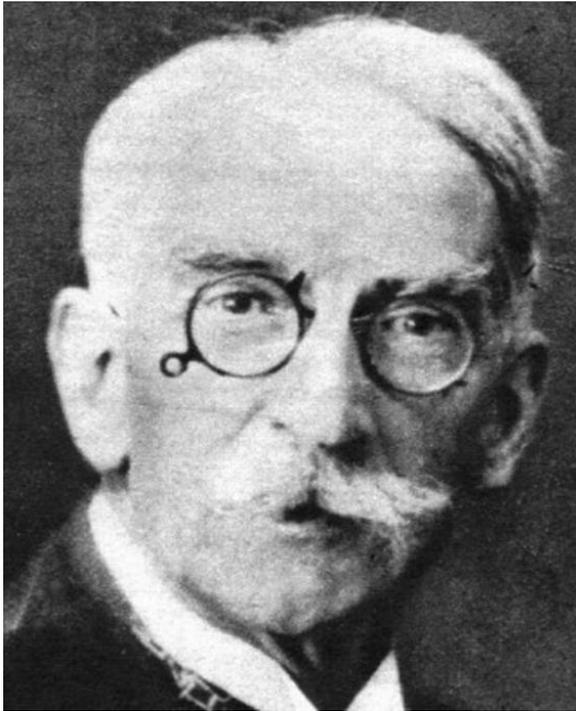
✓ 1845 г. эффект Фарадея

✓ 1873 г. уравнения Максвелла

✓ 1876 г. эффекты Керра

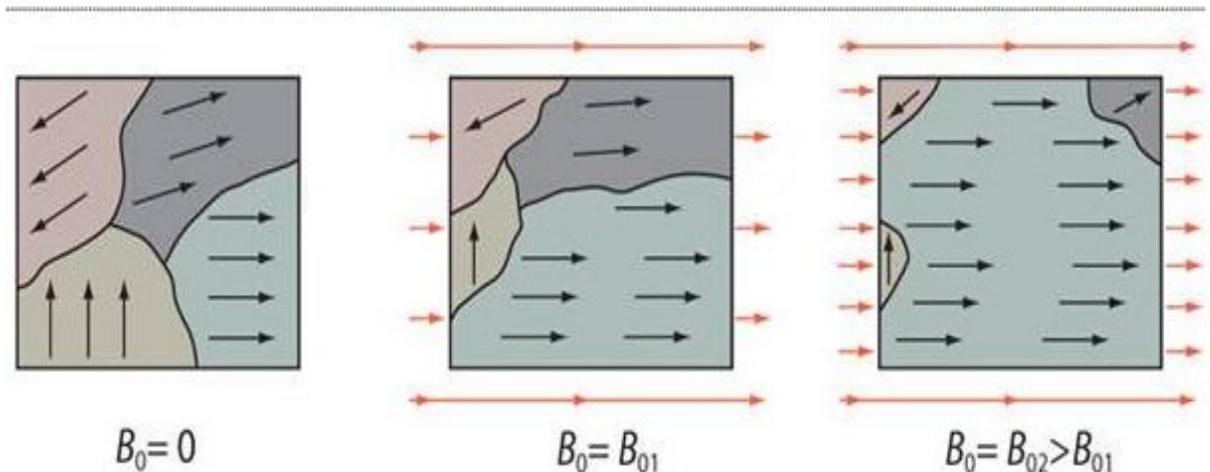
✓ 1896 г. Эффект Зеемана

# Гипотеза о существовании ДОМЕНОВ

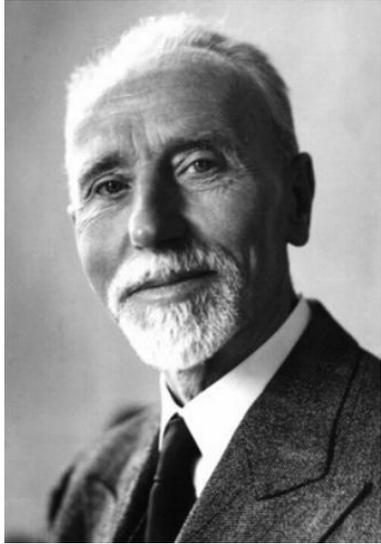


**Пьер-Эрнст Вейс**  
(1865 — 1940) —  
французский физик, один  
из основоположников  
теории ферромагнетизма.

В 1907 году впервые  
постулировал существование  
ферромагнитных доменов.



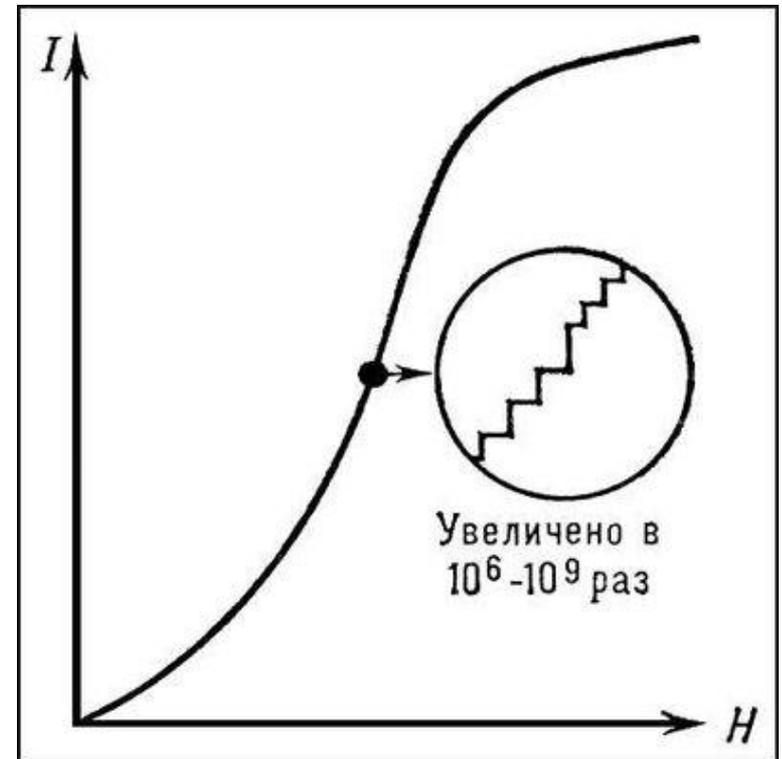
# Экспериментальное подтверждение гипотезы о существовании доменов



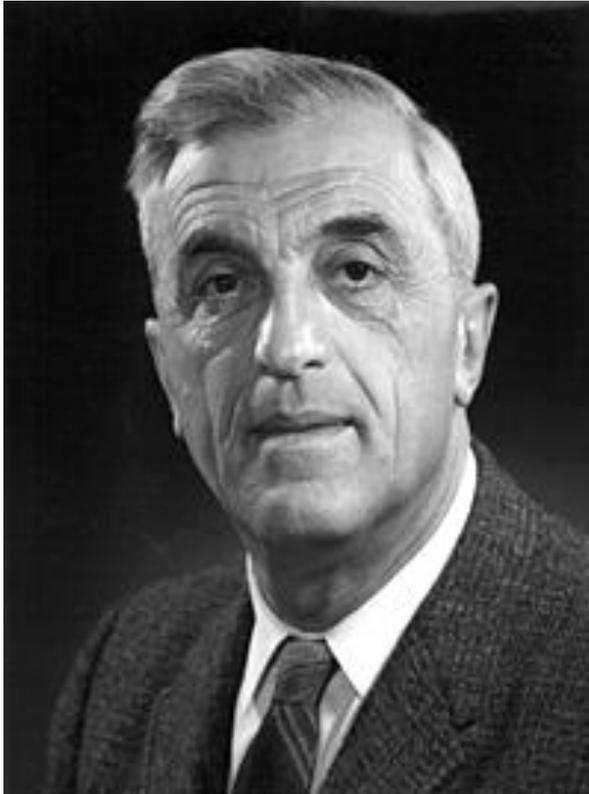
**Генрих Георг Баркгаузен**  
(1881 — 1956) —  
немецкий учёный в  
области электронной  
физики.

Гипотеза существования доменов в ферромагнетиках получила подтверждение в экспериментах Г. Баркгаузена в 1919 году.

Он обнаружил, что намагниченность при намагничивании ферромагнетика изменяется скачками.



# Структура доменных границ

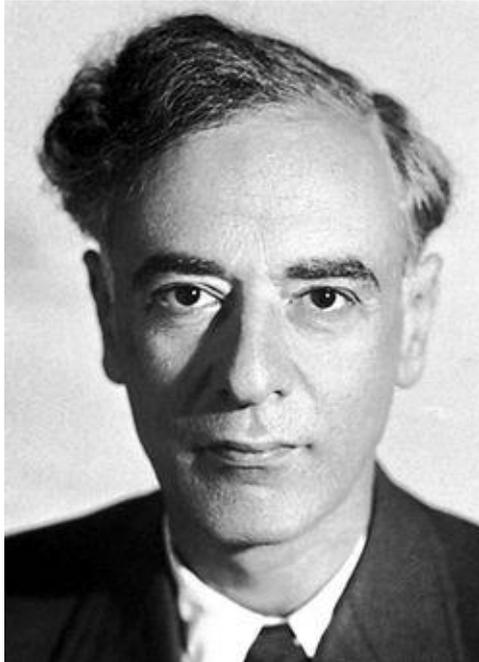


**Феликс Блох** (1905 — 1983) — швейцарский физик, работал главным образом в США. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1952 г. (совместно с Эдвардом Пёрселлом). «за развитие новых методов для точных ядерных магнитных измерений и связанные с этим открытия». В 1954 — 1955 г. он был первым генеральным директором ЦЕРНа.

В 1932 году Ф. Блох впервые рассчитал переходный слой между доменами – структуру доменной границы. В его честь такую доменную границу называют блоховской.

# Теория доменной структуры

Первая теория, описывающая размеры и форму доменов, была построена в 1935 году Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем. Согласно этой теории, намагниченность в доменах практически однородна. Различные домены отделены один от другого переходным слоем – доменной границей. Толщина доменной границы значительно больше межатомного расстояния, то есть граница имеет макроскопические размеры.



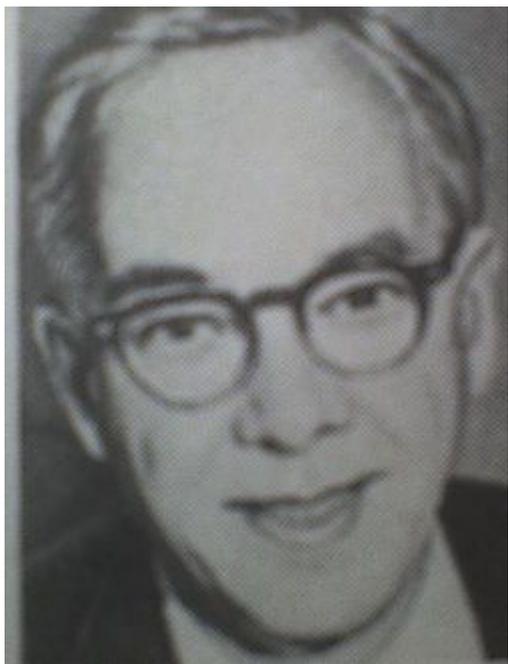
**Ландау Лев Давидович (1908 — 1968) — выдающийся советский физик-теоретик. Лауреат Нобелевской премии по физике 1962 г. «за пионерские исследования в теории конденсированного состояния, в особенности жидкого гелия».**



**Лифшиц Евгений Михайлович (1915 — 1985)**

# Метод порошковых фигур

Впервые непосредственно в микроскоп наблюдали магнитные домены в 1932 году Ф. Биттер, Л.В. Хамос и П.А. Тиссен.



**Френсис Биттер  
(1902 — 1967)  
американский физик,  
член Американской  
академии искусств и  
науки.**





**Фонограф Эдисона**  
представлен 21  
ноября 1877 года

Звук записывается на носителе в форме дорожки, глубина которой пропорциональна громкости звука. Звуковая дорожка фонографа размещается по цилиндрической спирали на сменном вращающемся барабане. При воспроизведении игла, движущаяся по канавке, передаёт колебания на упругую мембрану, которая излучает звук.



**Оберлин Смит (1840 – 1926)**  
американский инженер.  
В 1888 г. опубликовал самую  
первую работу, посвященной  
магнитной записи информации.

# Телеграфон Поульсена



**Вальдемар Поульсен** (1869 — 1942) — датский инженер. Разработал способ магнитной записи на проволоку в 1899 г.



**Схема опыта  
Поульсена по  
магнитной записи  
информации**

# Первые устройства для магнитной записи звука.

- ✓ В 1929 г. Луи Блаттнер заменил проволоку на тонкую стальную ленту
- ✓ В 1931 г. Кларенс Н. Хикман из американской корпорации Bell Labs создал прототип автоответчика на стальной ленте.
- ✓ В 1932 г. BBC впервые применила в своем вещании аппарат магнитной записи на тонкой стальной ленте шириной 3 мм и толщиной 0,08 мм.

Скорость движения ленты относительно записывающей и воспроизводящей головок составляла 1,5 м/с.

**На получасовую программу уходило 3 км ленты, а катушка с лентой весила 25 кг.**



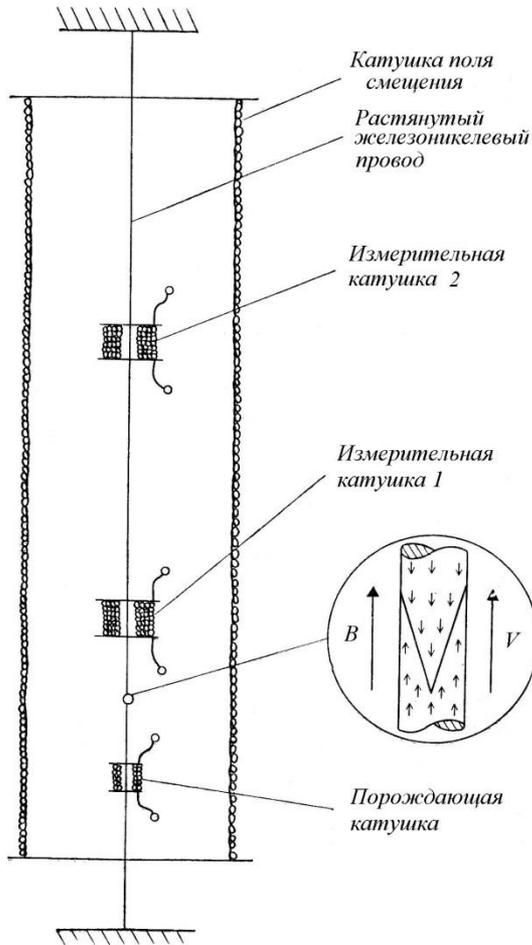
**Фриц Пфлоймер**  
(1881 – 1945)  
австро-германский  
инженер.  
Предложил  
использовать ленту  
для магнитной  
записи.

**Доктор Фридрих Маттиас:**  
**«Целлюлозный ацетат — лучший  
материал основы, а  
карбонильное железо — лучшее  
магнитное покрытие».**

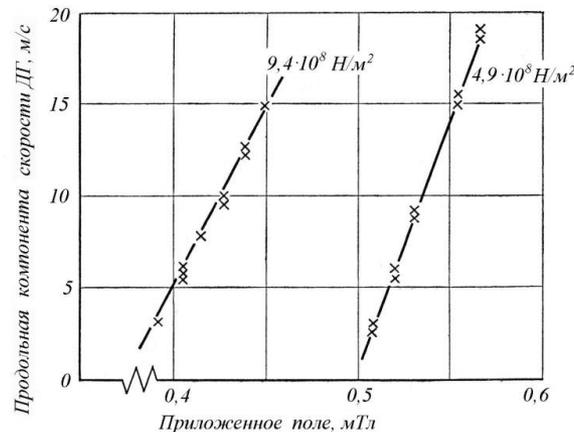
**1 июня 1934 года фирма BASF  
отправила 5000 метров ленты  
фирме AEG.**

**В 1936 году на фирме BASF  
впервые был записан концерт  
классической музыки.**

# Метод Сикстуса и Тонкса



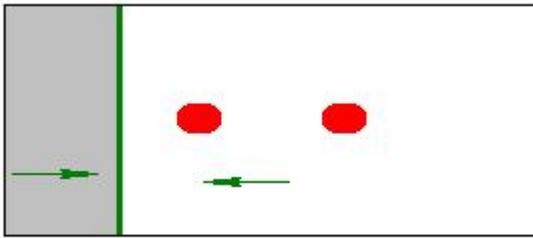
В 1930 г. Сикстус и Тонкс показали, что перемагничивание однородной проволоки происходит подобно фазовому превращению. Зародыш области, намагниченной в направлении поля, увеличивается в объеме за счет окружающей, противоположно намагниченной среды. При этом граница между новой и старой фазами движется вдоль проволоки с определенной скоростью. Процесс смещения ДГ играет главную роль при намагничивании в слабых полях.



Зависимости скорости движения ДГ от величины импульсного поля на проводе диаметром 0,38 мм из сплава 14% Ni и 86% Fe, при указанных растяжениях.

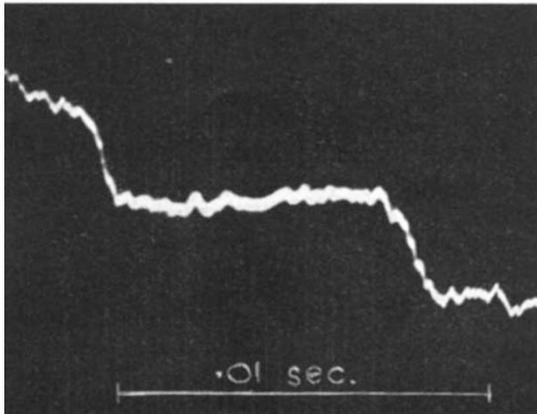
В 1956 г. Конгер и Эссинг предложили использовать тонкие магнитные пленки FeNi, для создания высокоскоростных устройств памяти цифровых ЭВМ.

В то время характерное время перемагничивания было порядка нескольких мкс, хотели сделать 2 нс



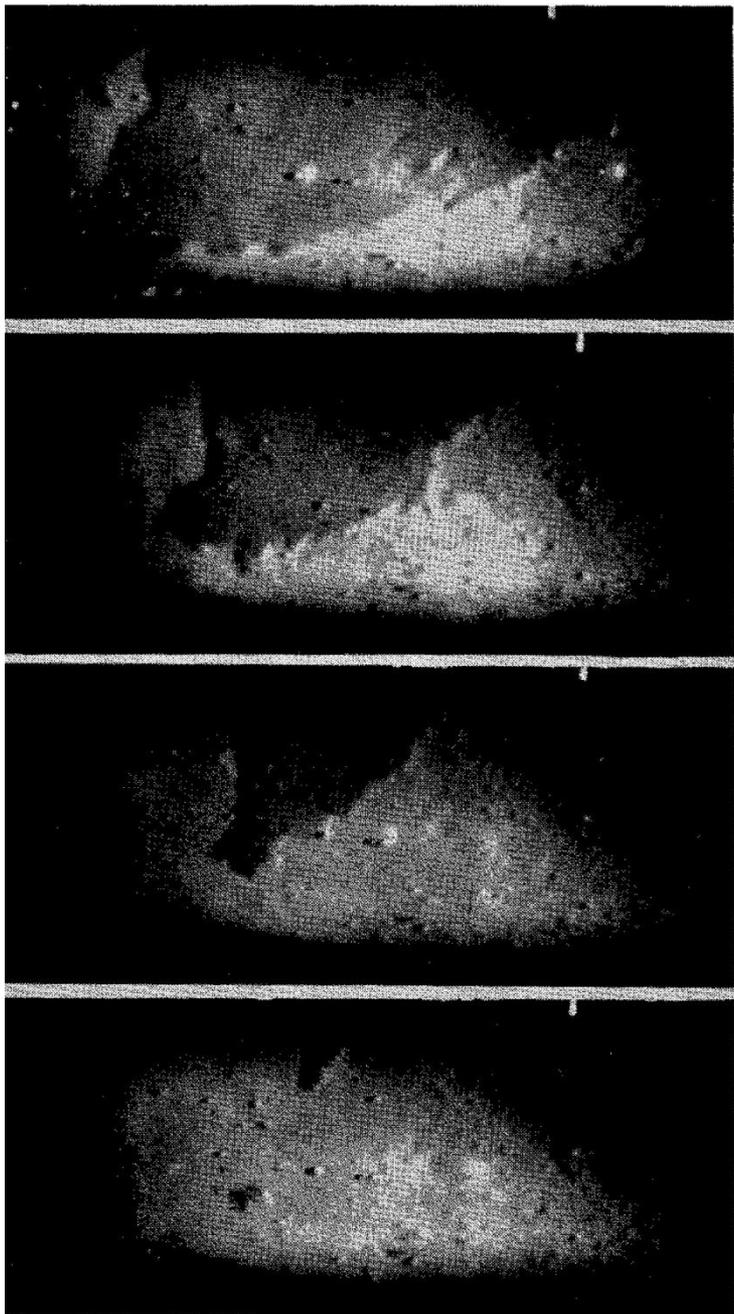
$V \rightarrow$

С помощью эффекта Керра Ли и Кэллаби [Lee E.W., Callaby D.R. Nature. V. 182, p. 254 (1958)] непосредственно наблюдали перемагничивание в FeNi пленке.



Из-за малости керровского сигнала по сравнению с шумами нужно было использовать методику стробирования, требующую периодического повторения процесса перемагничивания.

Позднее от использования FeNi пленок отказались, т.к. они не могли обеспечить высокую плотность записи.

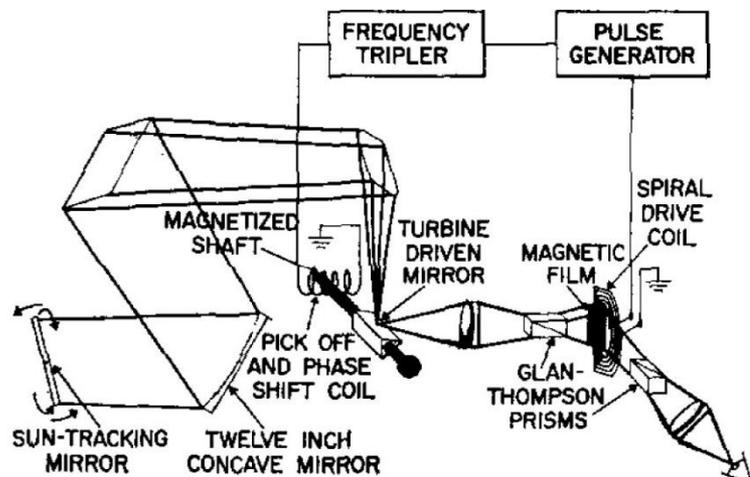


## Первые фотографии доменной структуры, выполненные с помощью эффекта Керра.

Доменная структура пленки (Ni 80%, Fe 20%) толщиной 10 – 50 нм процессе перемагничивания. Copeland J.A., Humphrey F.V., Journ. Appl. Phys., 34, 1211 (1963)

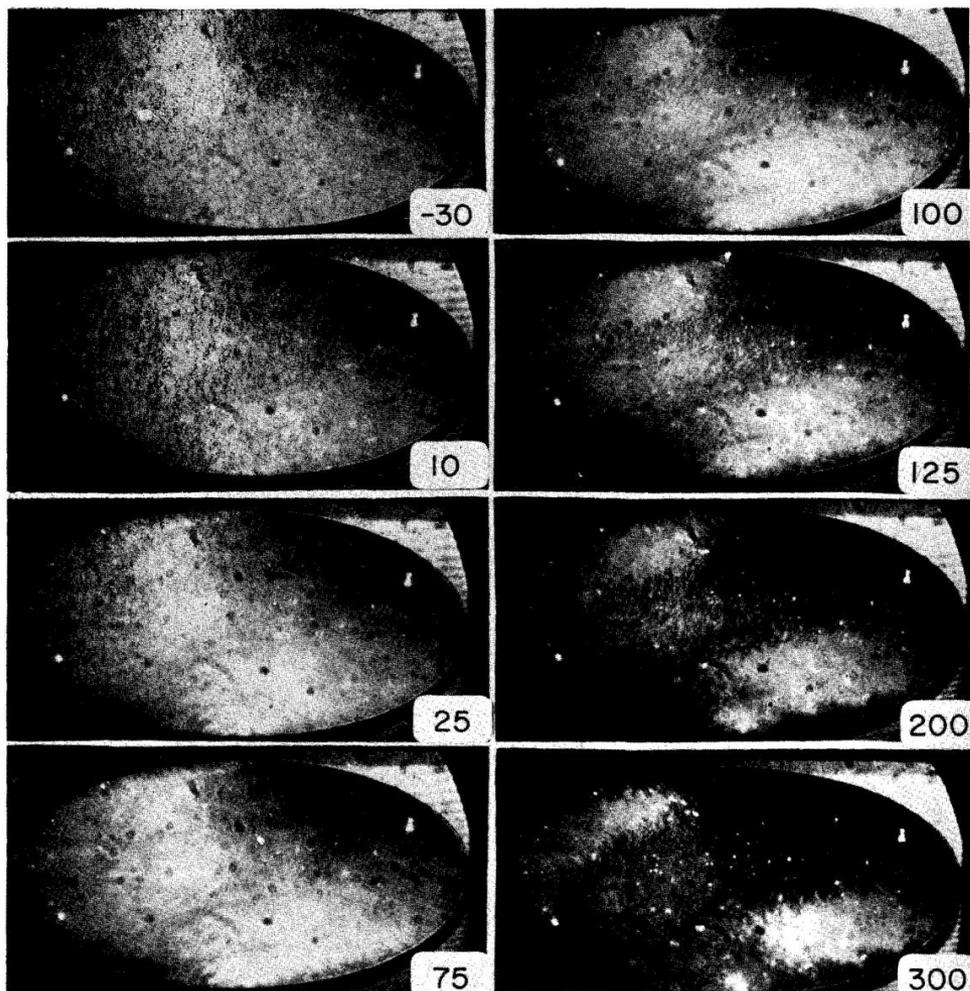
Длительность экспозиции порядка нескольких секунд.

Первые высокоскоростные фотографии доменной структуры для перемангничивания пленки Ni(80%) Fe(20%) толщиной 0,1 мкм. [Conger R.L., Moore G.H., Journ. Appl. Phys., 34, 1213 (1963)]



Солнечный свет попадал на многогранное зеркало, вращающееся с частотой  $10^6$  об/мин, импульс света имел длительность 100 нс. Из-за низкой интенсивности света нельзя было получать однократные снимки, поэтому пленка периодически подмагничивалась. При этом между началом импульса поля и вспышкой света устанавливали определенную задержку, в результате получали снимок с экспозицией, соответствующей наложению нескольких тысяч световых импульсов.

**Первые истинно высокоскоростные одноимпульсные фотографии процесса перемагничивания получили Крайдет и Хамфри [Kryder M.H., Humphrey F.B. Domains and magnetization reversal. Journ. of Appl. Phys. 41, 1130 (1970)]**



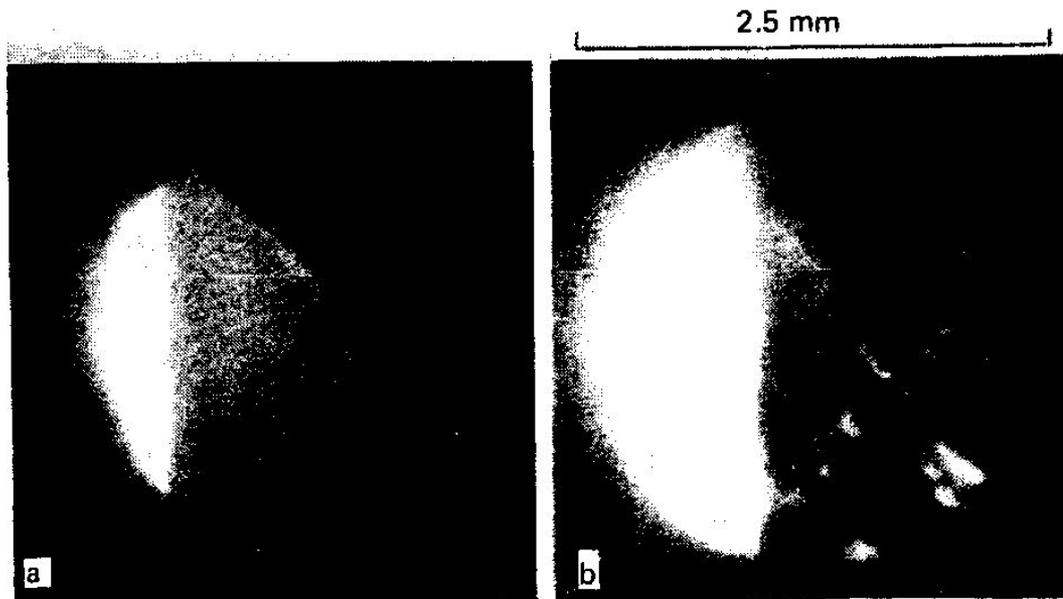
**Серия однократных фотографий, иллюстрирующих процесс перемагничивания пленки Fe (19%)Ni (81%). Время в мкс после действия импульса поля. Использован эффект Керра и рубиновый лазер с длительностью импульса 10 нс**

# Прозрачные ферромагнетики: ферриты- гранаты и ортоферриты.

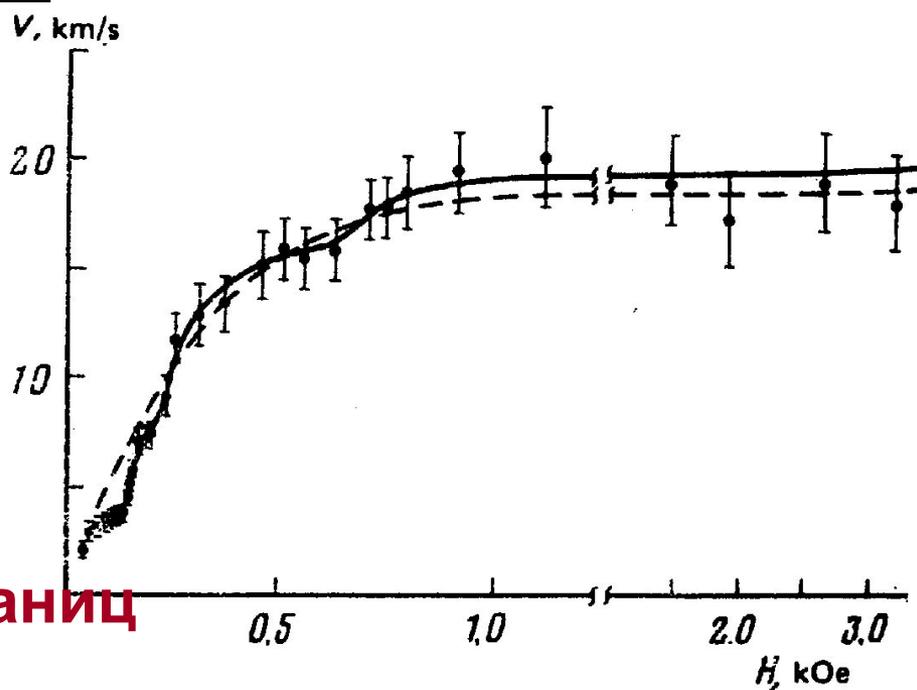
Нельсон и Дирборн [Neilson J.W., Dearborn E.F. Physics Chem. Solids, 5, 202 (1958)] вырастили монокристаллы непроводящего железоиттриевого граната  $Y_3Fe_5O_{12}$ .

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

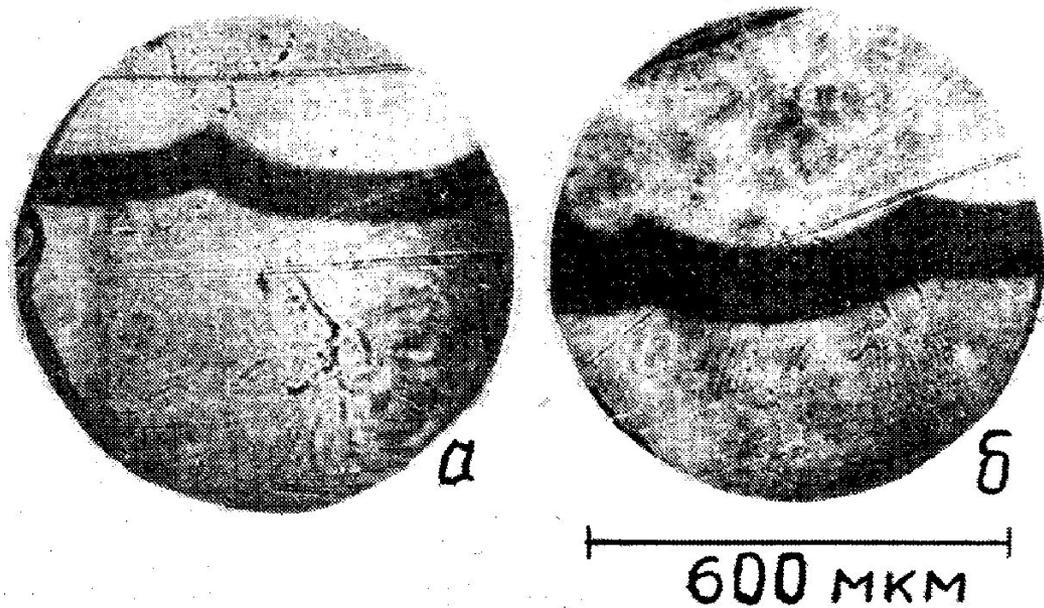
Эти материалы прозрачные в видимой и ИК области спектра и обладают большим удельным фарадеевским вращением.



Четкин М.В.,  
 Бынзаров Ж.И.,  
 Гадецкий С.Н.,  
 Щербаков Ю.И.  
 ЖЭТФ, 1981, т. 81, с.  
 1898. (длительность  
 импульса света 10 нс)



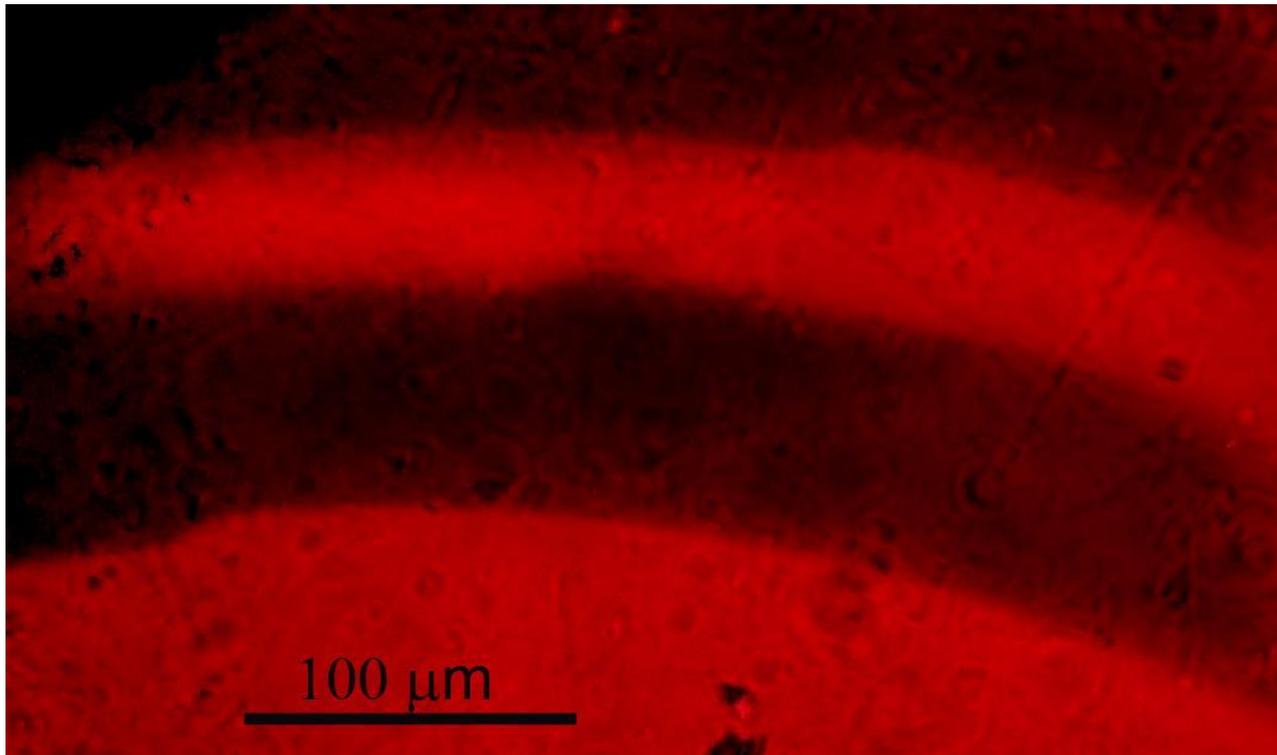
**Динамика доменных границ  
 в ороферрите иттрия**



Четкин М.В.,  
Кузьменко А.П.,  
Гадецкий С.Н.,  
Филатов В.Н.,  
Ахуткина А.И.—  
Письма ЖЭТФ,  
1983, т. 37, с. 223.

**Двукратные фотографии динамической ДГ в  $YFeO_3$ . ДГ движется сверху вниз, длительность импульса света 1 нс, интервал между импульсами 5 нс а – при комнатной температуре, б – при 100 К.**

# Трехкратная высокоскоростная фотография динамической доменной границы в пластинке $\text{YFeO}_3$ .



Chetkin M.V.,  
Kurbatova Yu.N.,  
Shapaeva T.B.  
JMMM, v. 321, N7,  
с. 800-802 (2009).

Время задержки между 1 и 2 световыми импульсами 8 нс,  
время задержки между 2 и 3 световыми импульсами 6 нс.  
Длительность светового импульса  $\frac{1}{4}$  нс

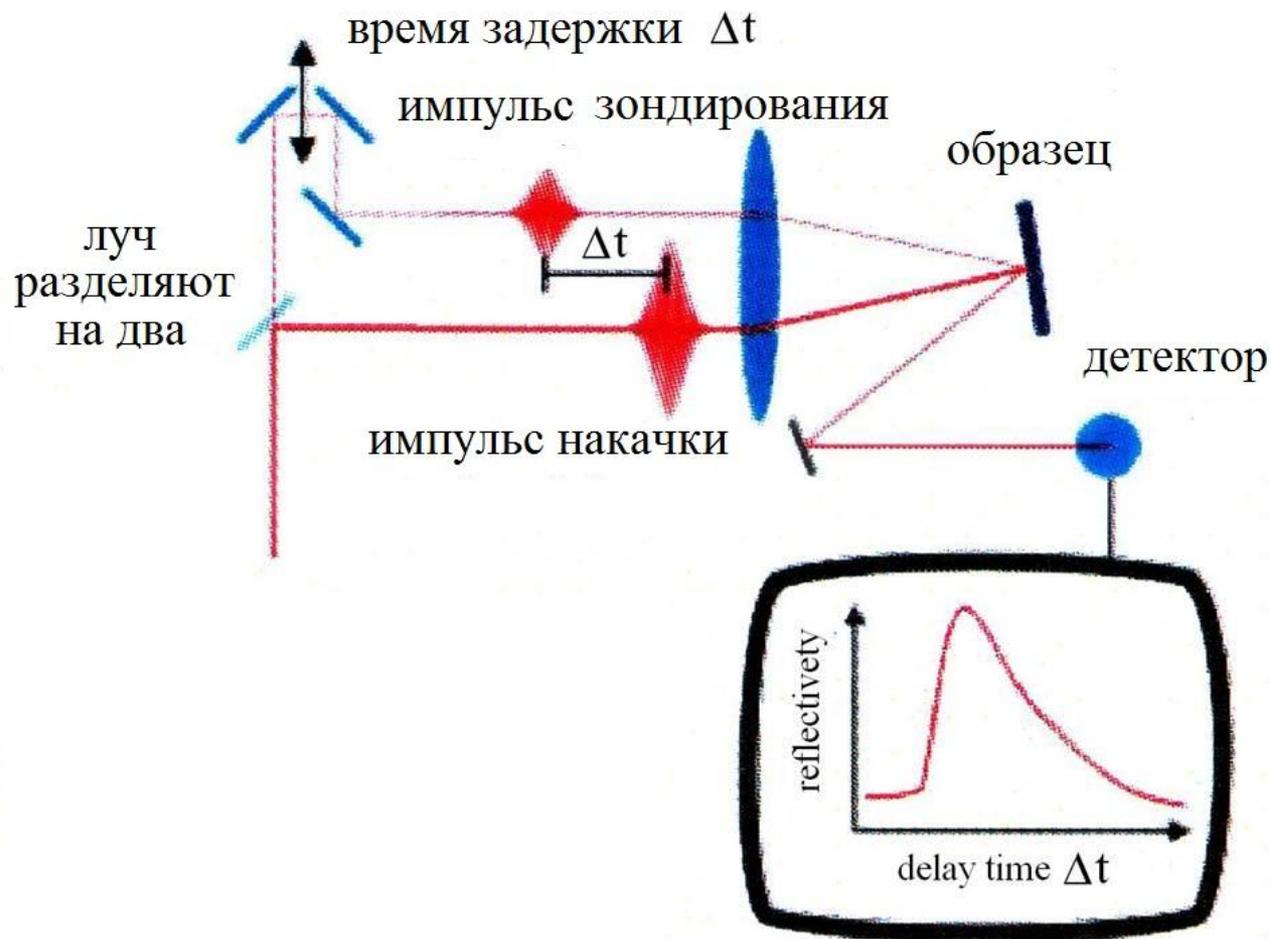
# Причины по которым МО начала бурно развиваться во второй половине 20 столетия

1. *Эффекты Керра важны для современных технологий записи и считывания информации, потому что позволяют считывать информацию, записанную магнитными методами, с помощью оптических методов.*
2. *Эффекты Керра стали широко использоваться, в магнитооптической спектроскопии для исследования магнитных материалов.*

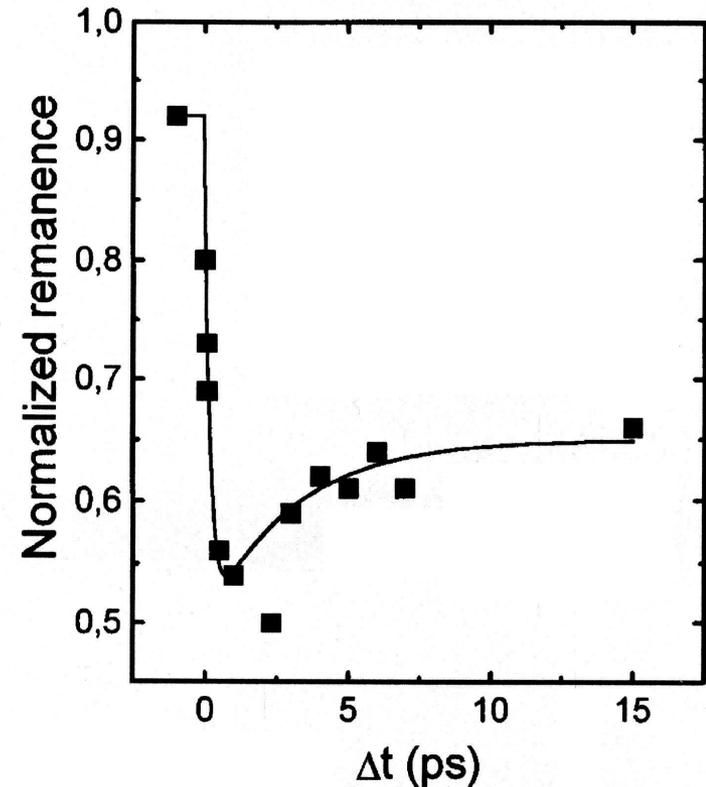
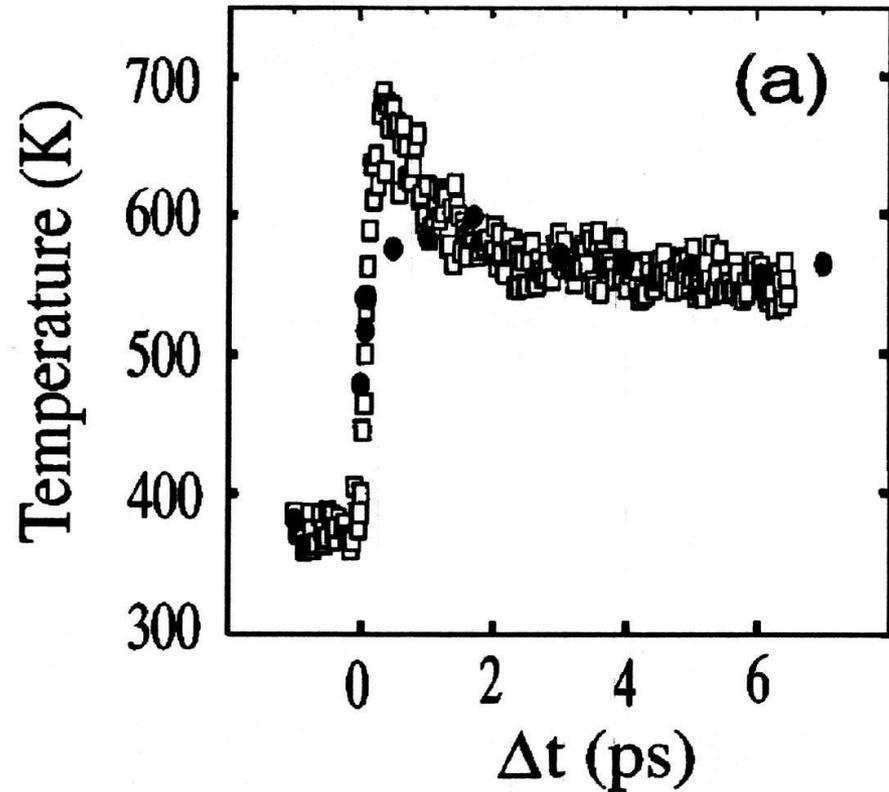
В настоящее время во всем мире продолжается поиск новых магнитных материалов для **наноэлектроники, спинтроники, магнитофотоники** и изучение их свойств.

Новые магнитные материалы: **низкоразмерные магнитные материалы, ультратонкие магнитные пленки, мультислойные структуры, нанокompозиты, разбавленные магнитные полупроводники, мультиферроики.**

# Схема эксперимента накачка-зондирование на основе эффекта Керра

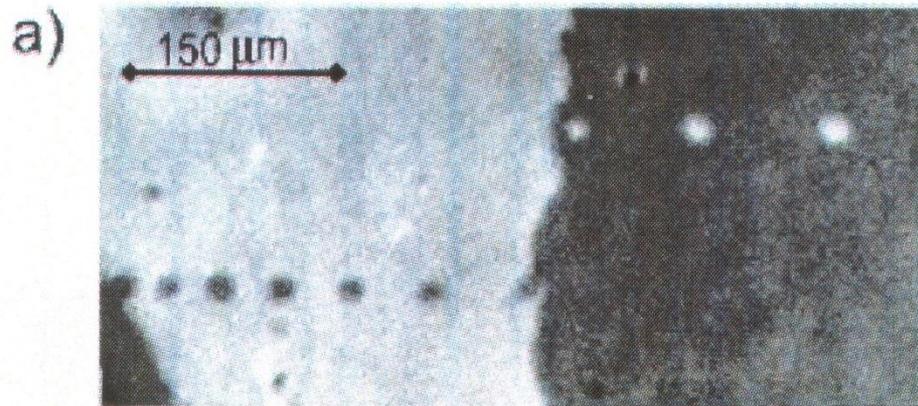


[Beaurepaire, E., Merle, J.-C., Daunois, A. & Bigot, J.-Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel. Phys. Rev. Lett. 76, 4250 (1996).]



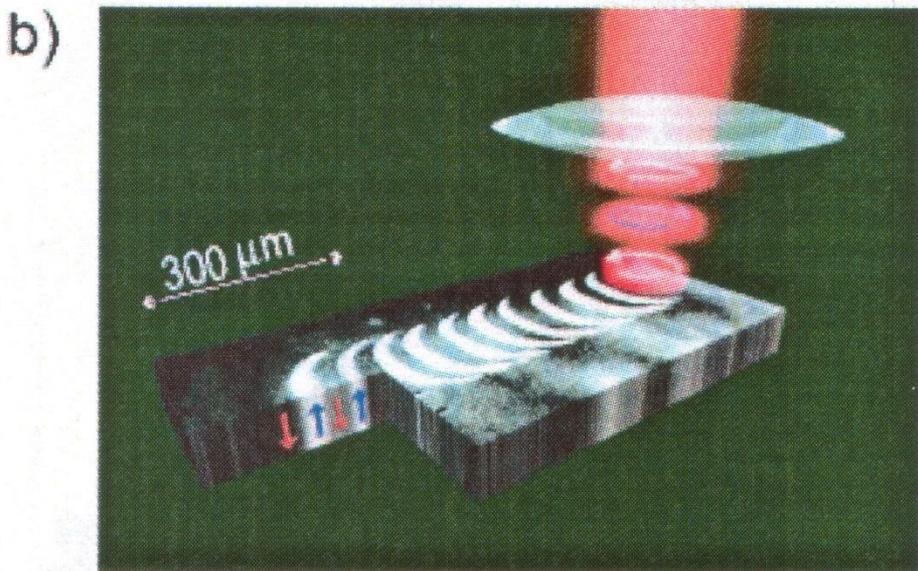
Изменение температуры со временем, прошедшим после накачки

Остаточная намагниченность после воздействия импульса с энергией 7 мДж/см<sup>2</sup> на образец Ni толщиной 22 нм. Сигнал нормирован на сигнал в отсутствие накачки.



$\sigma^+$   
 $\sigma^-$

а. Доменная структура, полученная после прохождения со скоростью 50 мм/с циркулярно поляризованного света вдоль поверхности образца так, что каждый импульс создавал разное пятно. Энергия в импульсе 2,9 мДж/см<sup>2</sup>.



б. Демонстрация контраста полностью оптической записи магнитного бита. Это достигается сканированием циркулярно поляризованного лазерного луча с соответствующим направлением поляризации вдоль образца.

**Kirilyk A.I., Kimel A.V., Rasing T. IEEE Transaction on Magnetics, v.44, N 7, 1905, 2008**

# История магнитооптики.

- ✓ Открытие магнитооптических эффектов.
- ✓ Гипотеза существования доменов.
- ✓ Магнитная запись
- ✓ Наблюдение доменов с помощью эффекта Керра.
- ✓ Появление новых материалов – прозрачные ферромагнитные диэлектрики. Активное использование магнитооптики для исследования их свойств и возможностей практического применения.
- ✓ Появление импульсных лазеров, развитие метода высокоскоростной фотографии для исследования динамических процессов в магнетиках.
- ✓ Появление мощных импульсных лазеров – проведение оптомагнитных экспериментов.

# Магнитооптика на кафедре магнетизма

- ✓ У истоков магнитооптики на кафедре стоял Г.С. Кринчик.
- ✓ Единственное открытие на кафедре – аномальная магнитная восприимчивость ферромагнетиков на оптических частотах
  - ✓ задача о нахождении компонент тензора  $[\mu]$  включена в учебник Ландау Лифшица «Электродинамика сплошных сред»
- ✓ Экспериментально обнаружено, что предельная скорость движения ДГ в ортоферритах равна скорости спиновых волн и равна 20 км/с
- ✓ Участие в НИР
  - ✓ Создание МОУТ (устройства для записи и хранения информации)
  - ✓ Исследование свойств магнитных головок магнитооптическими методами.

# Кринчик Георгий Сергеевич

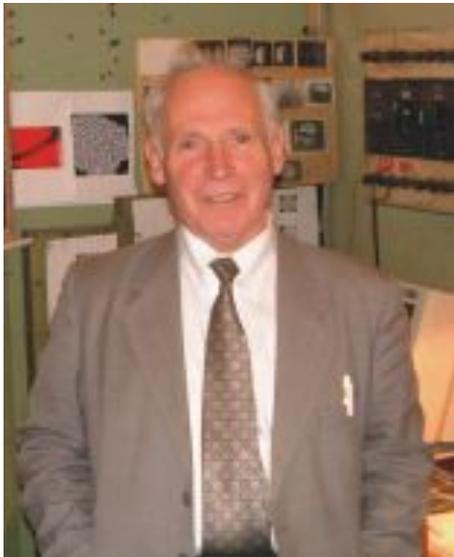


(06.08.1927 –  
05.12.1998)

- ✓ Экспериментально обнаружено явление поверхностного магнетизма.
- ✓ Предложил магнитооптический метод измерения магнитных характеристик тонкого поверхностного слоя (около 10 нм) ферромагнетиков и магнитооптический метод измерения ширины доменных границ в магнитных кристаллах.
- ✓ Экспериментально обнаружена смена знака эффекта Фарадея в точке компенсации ферромагнетиков. Это подтвердило теорию ферромагнетизма Нееля.
- ✓ Была разработана феноменологическая теория магнитооптических эффектов в бигиротропных ферромагнетиках.
- ✓ Величина обменного расщепления ферромагнитного никеля была впервые определена магнитооптическими методами. Из результатов магнитооптических экспериментов была предложена модель электронной структуры никеля с обратным, чем было принято раньше, порядком уровней. Такая модель ферромагнитного никеля в настоящее время является общепринятой.



**Кринчик  
Георгий Сергеевич**

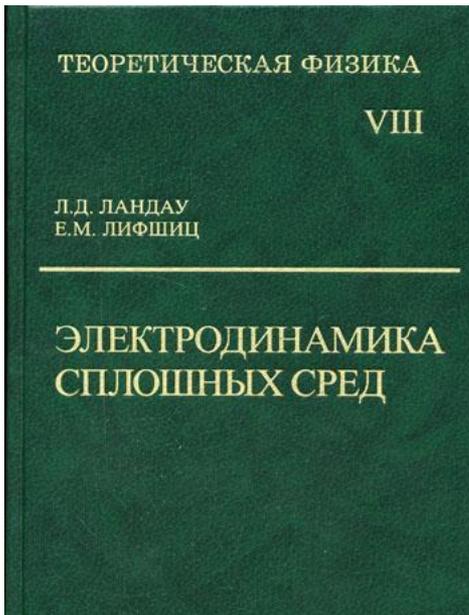


**Четкин  
Михаил Васильевич**

**Авторы открытия № 175 «Аномальная магнитная восприимчивость ферромагнетиков в оптическом диапазоне частот».**

**27 мая 1976 г. открытие внесено в Государственный реестр открытий СССР за N 175 с приоритетом от 17 марта 1961 г. и с формулой в следующей редакции:  
"Установлено неизвестное ранее явление аномальной магнитной восприимчивости ферромагнетиков в оптическом диапазоне частот, заключающееся в том, что магнитное поле световой волны вызывает аномально большую прецессию магнитного момента ферромагнетиков, приводящую к их бигиротропии и к частотно-независимому вращению плоскости поляризации света".**

# Магнитооптика на кафедре магнетизма



Задача о нахождении компонент тензора  $[\mu]$  включена в учебник Ландау Лифшица «Электродинамика сплошных сред» 1982 г., стр. 376

376

УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

[ГЛ. IX

## Задачи

1. В рамках макроскопического уравнения движения магнитного момента (уравнение Ландау—Лифшица, см. IX (69,9)), в отсутствие диссипации, найти тензор магнитной проницаемости для однородно намагниченного одноосного ферромагнетика типа легкая ось (*Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, 1935*).

Решение. Уравнение движения намагниченности в ферромагнетике:

$$\dot{\mathbf{M}} = \gamma [(\mathbf{H} + \beta M_z \mathbf{v}) \mathbf{M}],$$

# **Новые магнитооптические эффекты, открытые в МГУ:**

**1972 – Ориентационный магнитооптический эффект  
(Кринчик Г.С., Гущин В.С.)**

**1973 – Интенсивностные полярный и меридиональный  
эффекты  
(Кринчик Г.С., Шалыгина Е.Е.)**

**1999 – Магниторефрактивный эффект в  
нанокompозитах  
(Ганьшина Е.А., Гущин В.С., Грановский А.Б.)**

# Магнитооптика на кафедре магнетизма

- ✓ Экспериментально обнаружено, что предельная скорость движения ДГ в ортоферритах равна скорости спиновых волн и равна 20 км/с
- ✓ Участие в НИР
  - ✓ Создание магнитооптических управляемых транспарантов (МОУТ – устройства для записи и хранения информации)
  - ✓ Исследование свойств магнитных головок магнитооптическими методами.

# История

1. Древний мир (до 7 века).
  2. Средние века (7 век – середина 17 века).
  3. Новое время (середина 17 в – начало 20 в).
- ✓ Становление современного магнетизма
4. Новейшее время (20 – 21 в).
- ✓ История магнитооптики.
  - ✓ Магнитооптика на кафедре магнетизма МГУ.