

Функциональные нано- и гетероструктуры магнитных полупроводников как основа MRAM и SPIN-LED

Оксана Коплак^{1,2}, Алексей Дмитриев²,
Сергей Зайцев³, Роман Моргунов²

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка
²УНЦ «ФХМ» Киевского национального университета
им. Т. Шевченко и НАНУ, Украина Киев

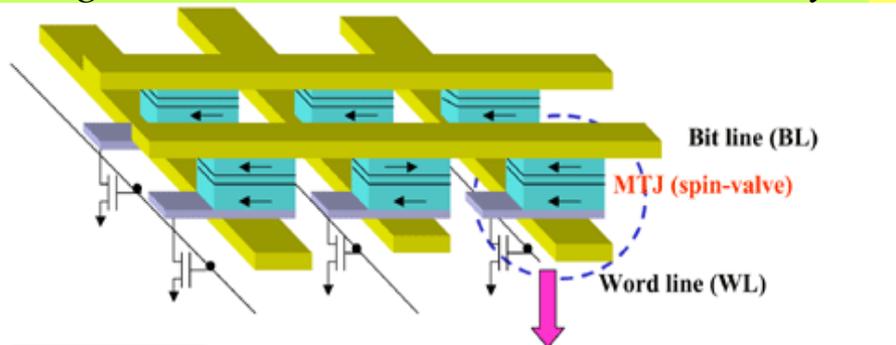


Всероссийская молодежная конференция
«Успехи химической физики»
21-23 июня 2011 г., Черноголовка

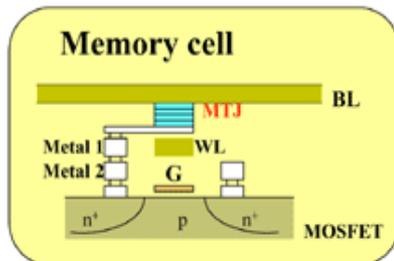
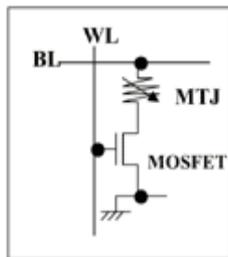


Магнитные элементы для MRAM и SPIN-LED

Magnetoresistive Random Access Memory



- Nonvolatile
- High density
- High speed
- Infinite endurance



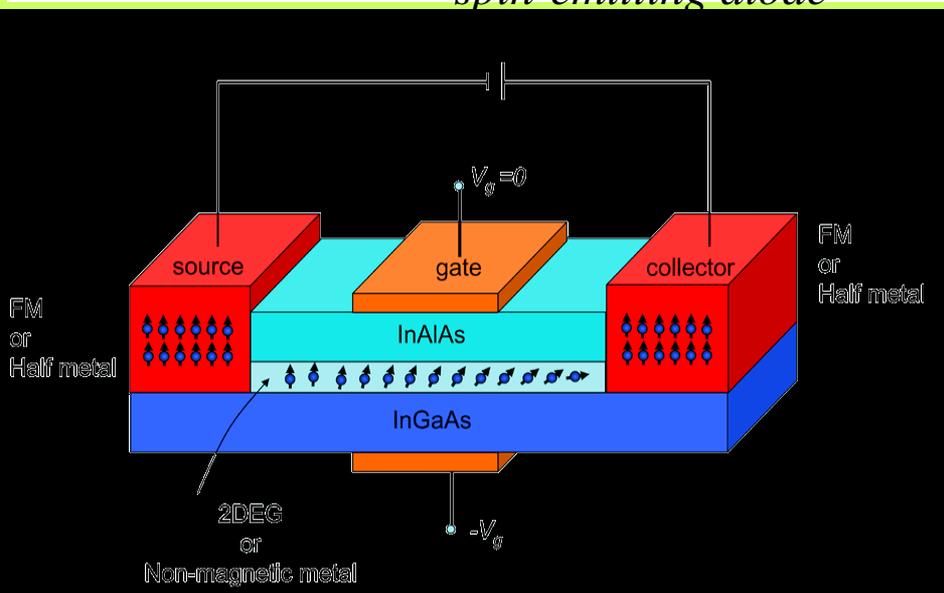
spin-emitting diode

Гетероструктуры
InGaAs/GaAs/ δ -<Mn>

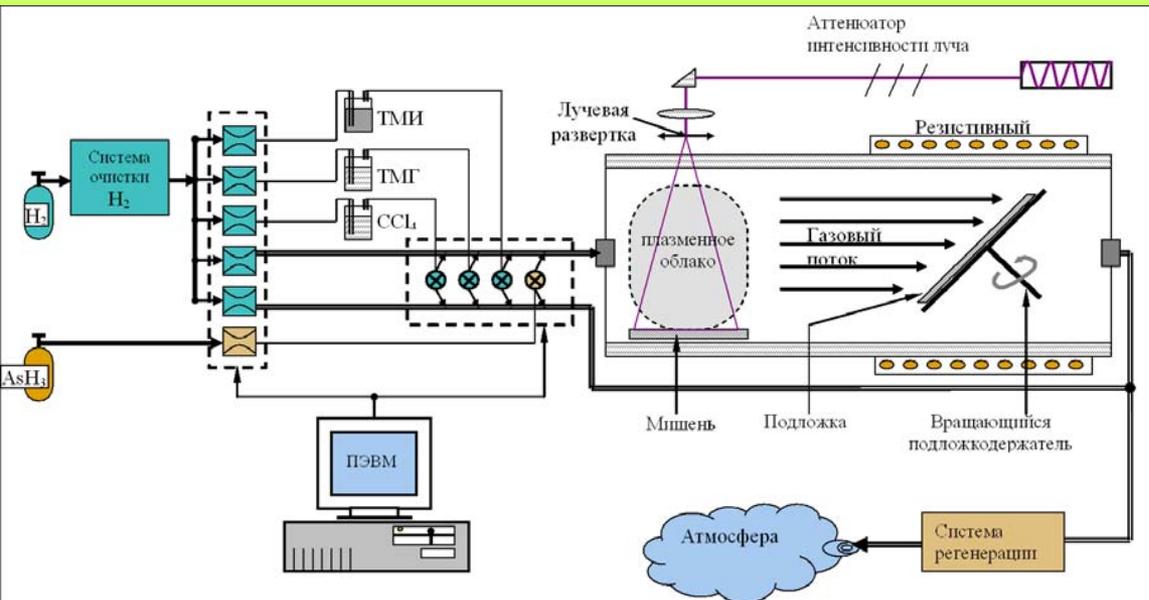
нанопленки Ge:Mn

нанопроволоки
Ge:Mn

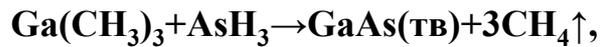
Цель исследований спиновой динамики гетероструктур – создание технологий управления их магнитными свойствами с помощью оптического и электрического воздействий на концентрацию и спиновую поляризацию носителей заряда в полупроводниках.



Выращивание гетероструктур InGaAs/GaAs/ δ -<Mn>

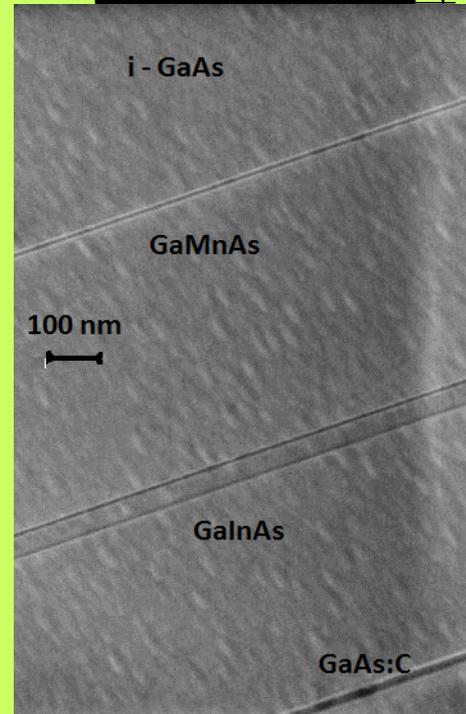
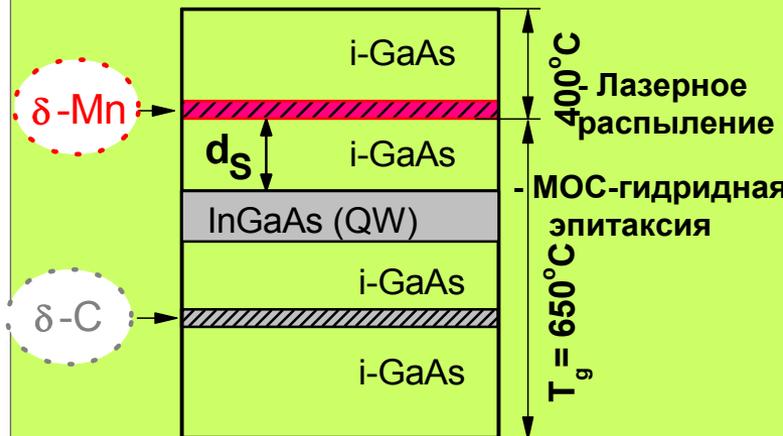


Реакция формирования GaAs
в МОС-гидридном процессе:

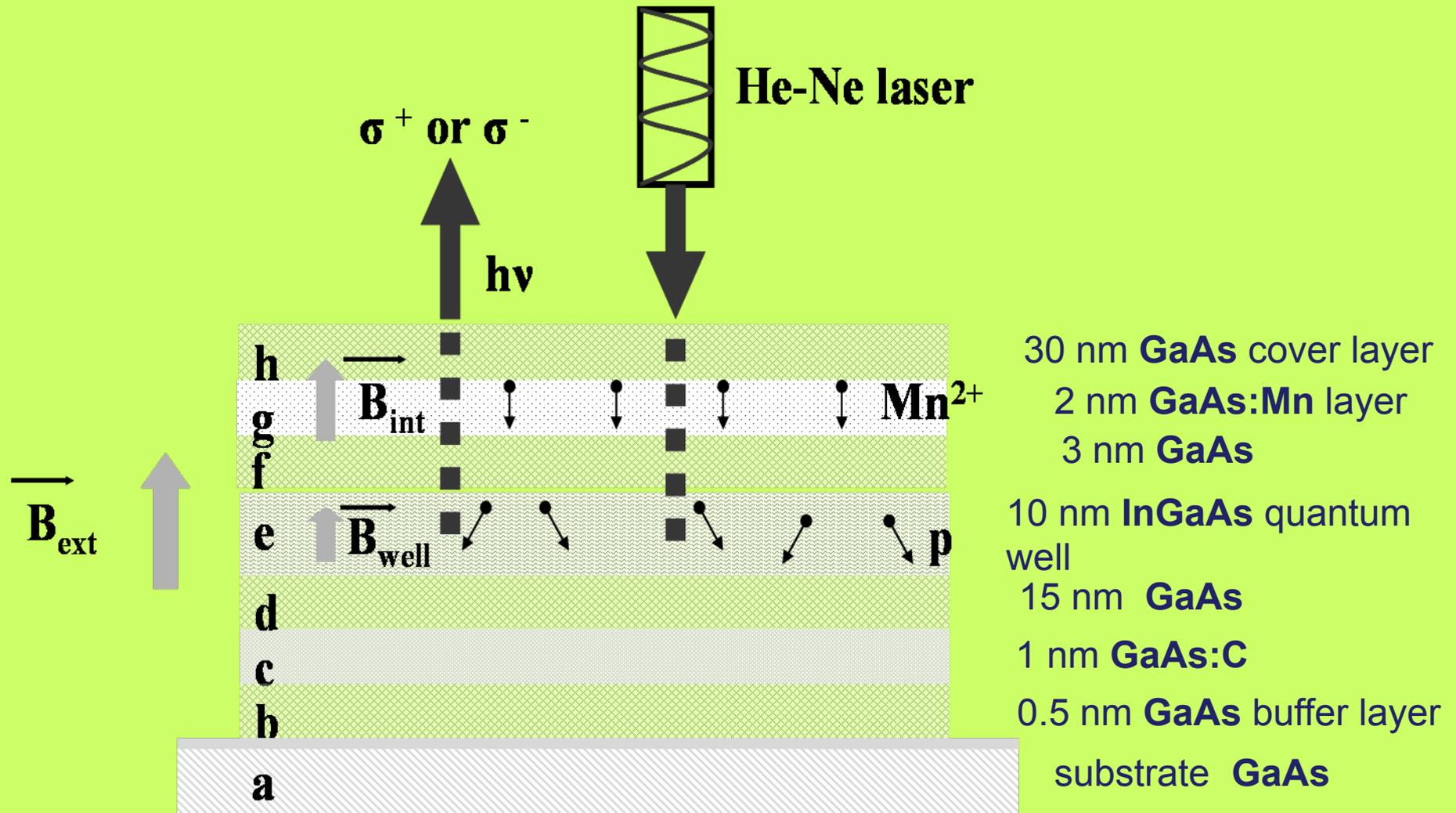


МОСГЭ+ Метод лазерного распыления

- Q-импульсный Nd:YAG лазер
- Барботер
- Регулятор расхода газа (PPF)
- Клапанный переключатель

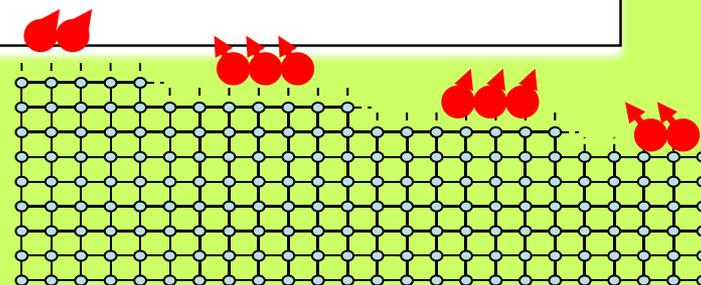
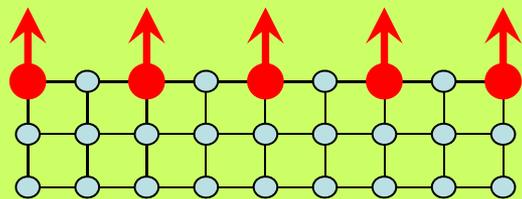
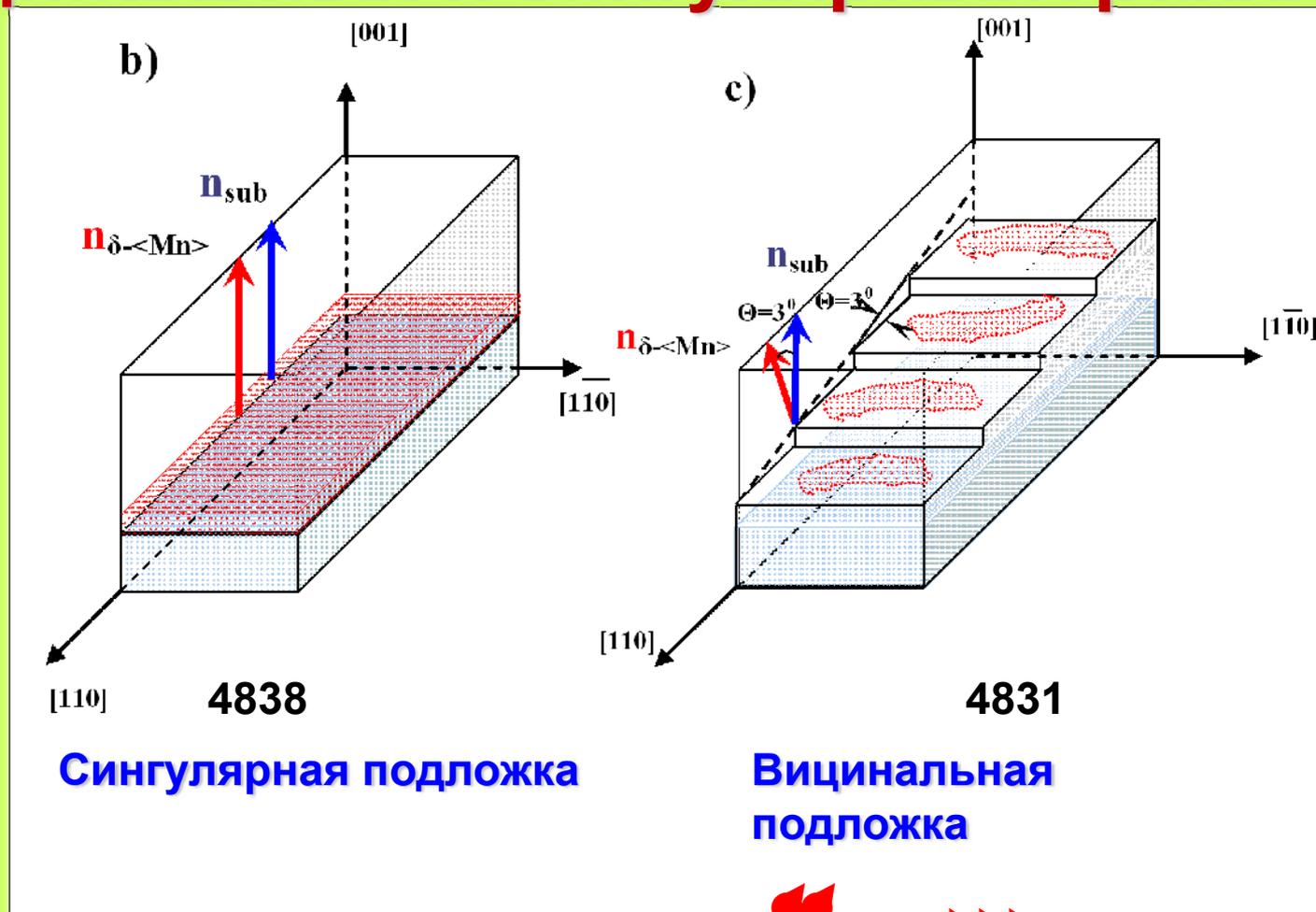


Гетероструктуры InGaAs/GaAs/ δ -<Mn>



\vec{B}_{ext} – внешнее магнитное поле, \vec{B}_{int} – магнитное поле ферромагнитного слоя,
 \vec{B}_{well} – магнитное поле в квантовой яме InGaAs, p – спин-поляризованные дырки.

Гетероструктуры InGaAs/GaAs/ δ -<Mn> на вицинальных и сингулярных гранях GaAs



Исследование магнитных свойств. Методика



MPMS 5XL Quantum Design

$T = 2 - 300 \text{ K}$, $H = 1 \text{ кЭ}$



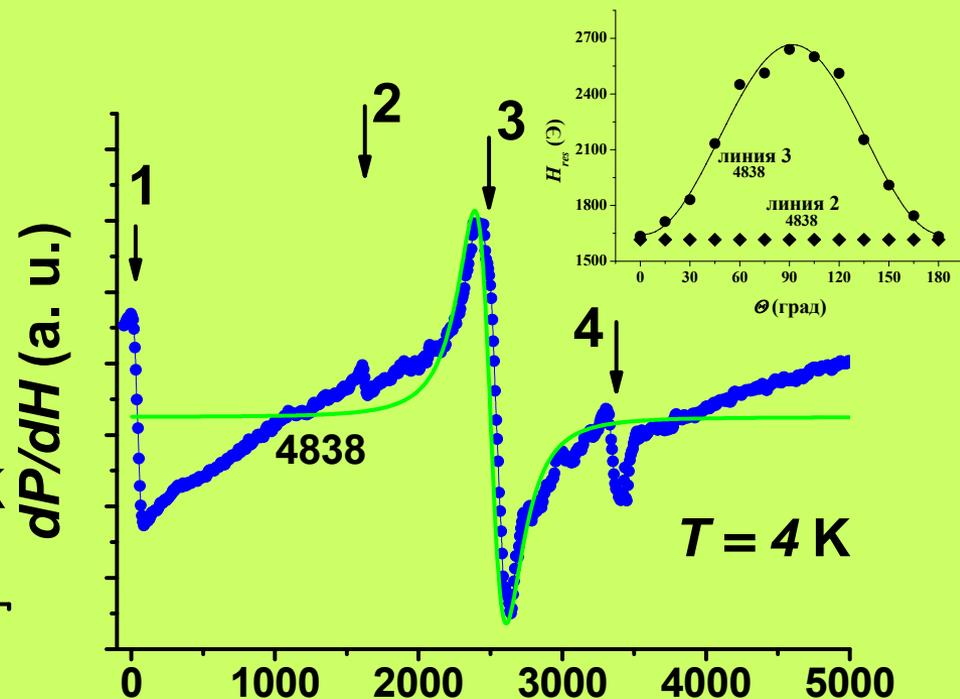
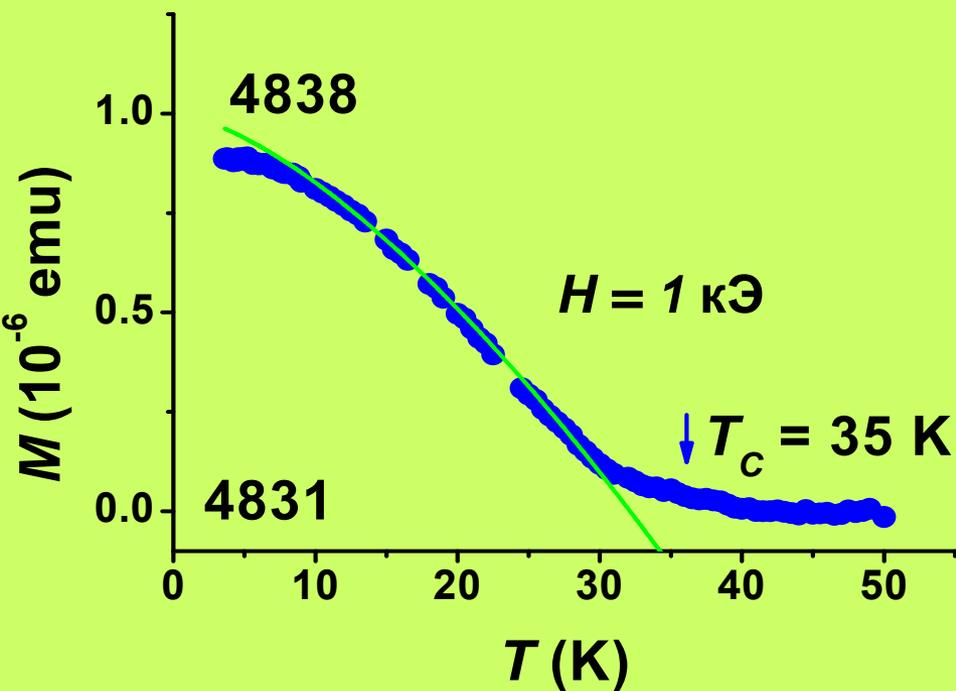
Bruker E500,

ESR 900 Oxford Instruments.

X-диапазон частота $\approx 9.65 \text{ ГГц}$,

$H = 0 - 14 \text{ кЭ}$

Магнитное упорядочение в сингулярных образцах



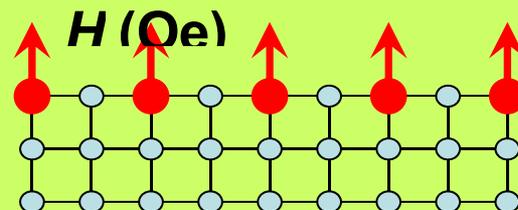
$$M(T) = M_0(1 - BT^{3/2})$$

$$T_C = \frac{zS(S+1)}{k_B} J$$

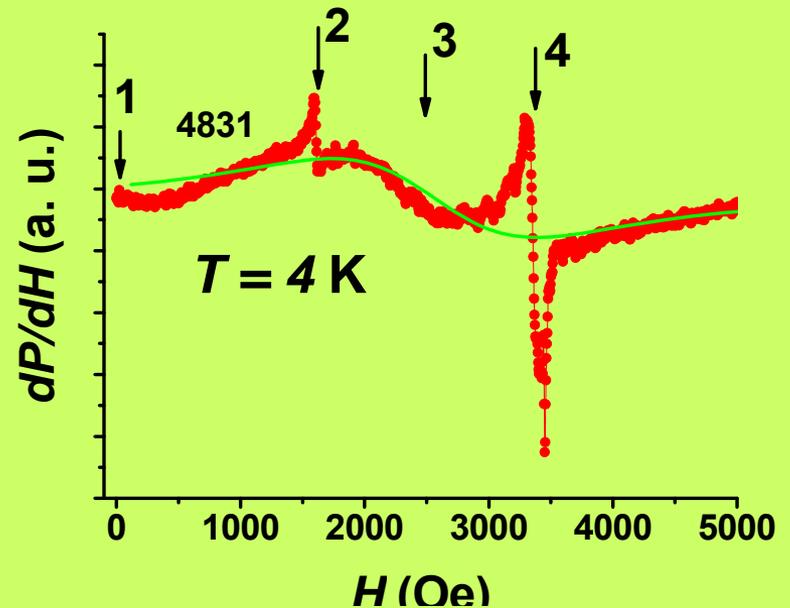
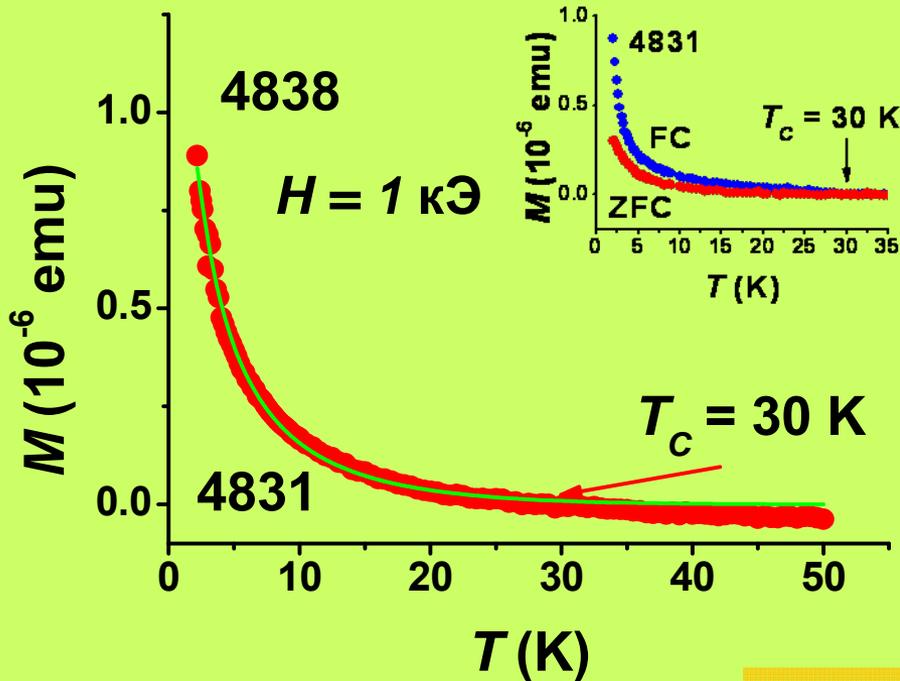
$$B = (5,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-3/2}$$

$$Z = 4, T_C = 35 \pm 5 \text{ K}$$

$$J = 18 \pm 3 \text{ мЭВ}$$



Магнитное упорядочение в вицинальных образцах



$$J = \frac{Dg\mu_B}{2Sr_s^2}$$

$$T_c = 30 \pm 3 \text{ K}$$

$$J = 72 \pm 3 \text{ мЭВ}$$

$$M(T) = M_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{R}{r_s} \right)^3 \ln^3 \frac{JS(S+1)}{T} \right] \right\}$$

r_s – расстояние между спинами

n – концентрация катионных позиций Ga^{3+} ,

$S = 5/2$ – спин ионов марганца Mn^{2+}

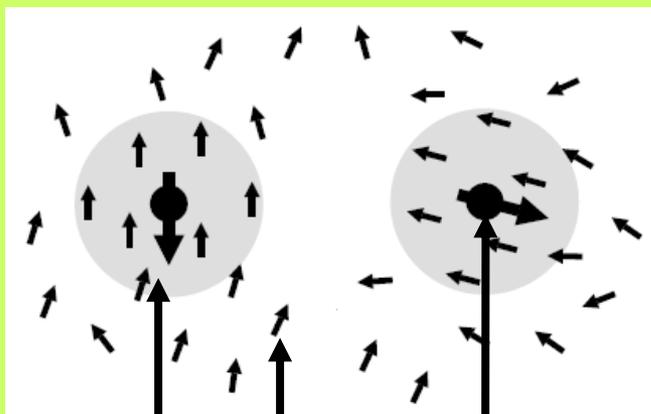
x – атомная доля примесных ионов марганца Mn^{2+}

D – коэффициент спин-волновой жесткости

$$r_s = \left(\frac{4\pi x n}{3} \right)^{-1/3}$$

$$T_c = JS(S+1) \exp \left(- \frac{0.87 r_s}{R} \right)$$

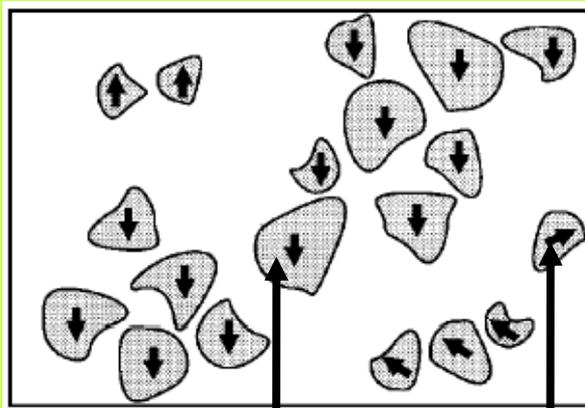
Перколяционный ферромагнетизм



полярон

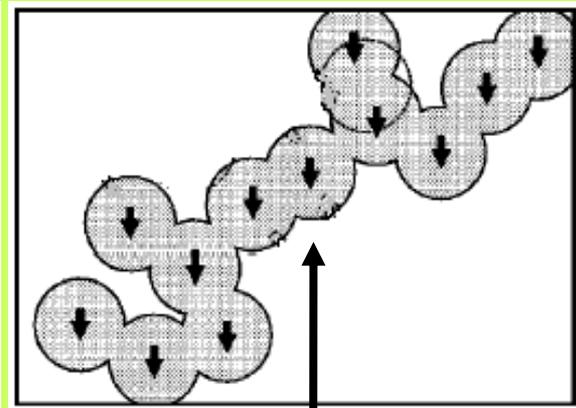
спин примесных ионов

спин локализованных носителей заряда



полярон

спин примесных ионов



кластер магнитных поляронов

$$T_C = sSJ(L^3 n_h)^{1/3} \sqrt{\frac{n_i}{n_h}} \exp\left(-\frac{0.86}{(L^3 n_h)^{1/3}}\right)$$

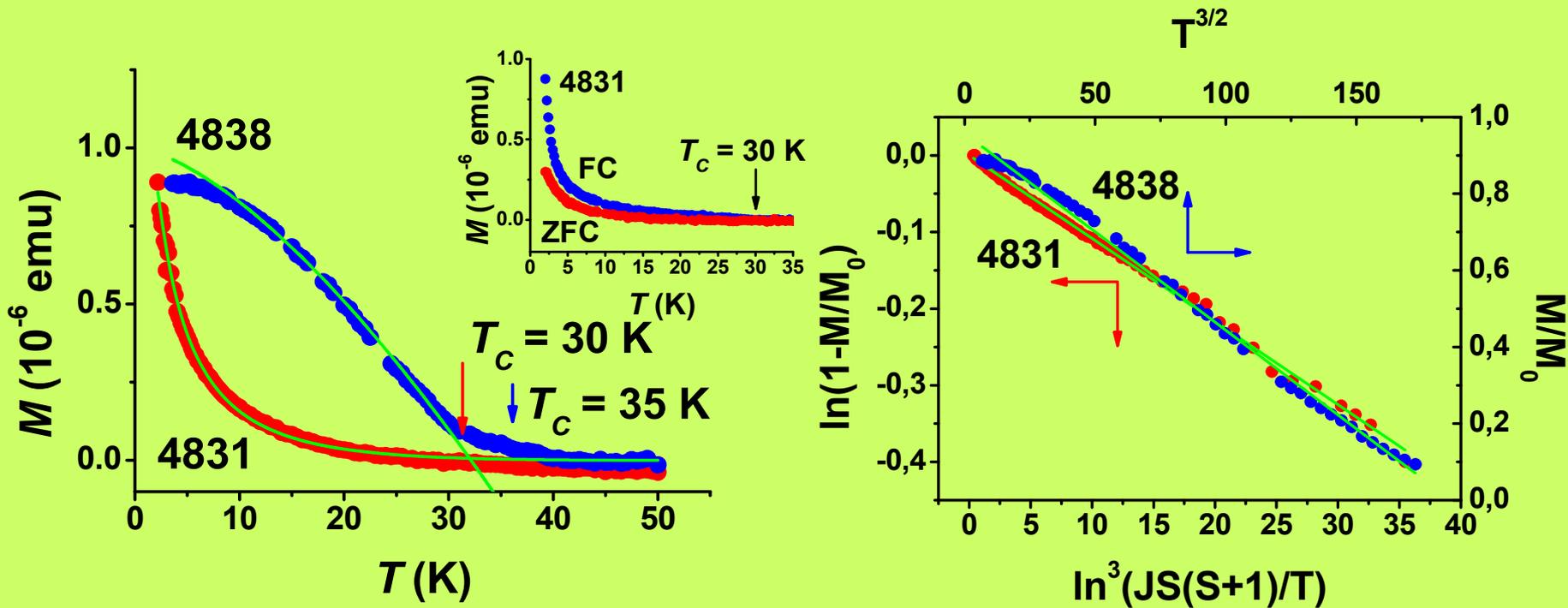
$s = 1/2$ - спин локализованной дырки, $S = 5/2$ - спин примесного иона Mn^{2+} , J - обменный интеграл, n_i - концентрация примесных ионов Mn^{2+} , n_h - концентрация локализованных дырок, L - радиус локализации дырок [1-3].

[1] И.Я. Коренблит, Е.Ф. Шендер, УФН 126, 233 (1978).

[2] A. Kaminski, S. Das Sarma, Phys. Rev. B 68, 235210 (2003).

[3] Э. Л. Нагаев, ЖЭТФ 56, 1013 (1969).

Блоховский и перколяционный типы магнитного упорядочения в гетероструктурах InGaAs/GaAs/ δ -<Mn>



На вставке температурные зависимости намагниченности образца, охлажденного в нулевом магнитном поле (ZFC) и в магнитном поле 10 kOe (FC).

$$T_c = 35.5 \text{ K}, J = 18.3 \text{ мЭВ} \quad B = (5.3 \pm 0.1) \text{ K}^{-3/2}$$

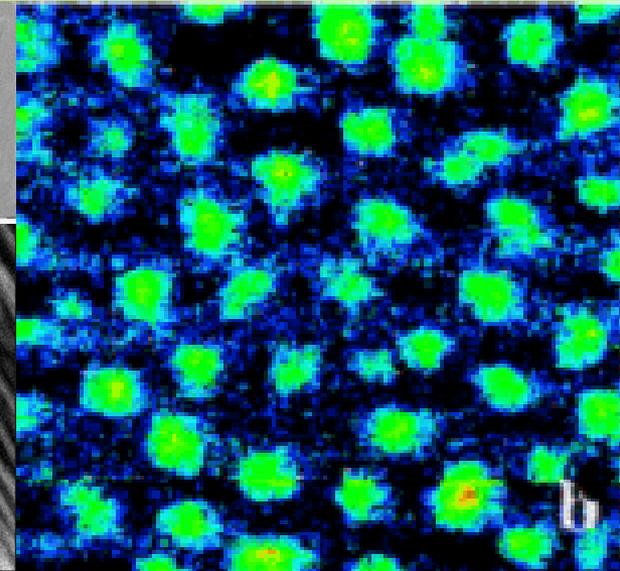
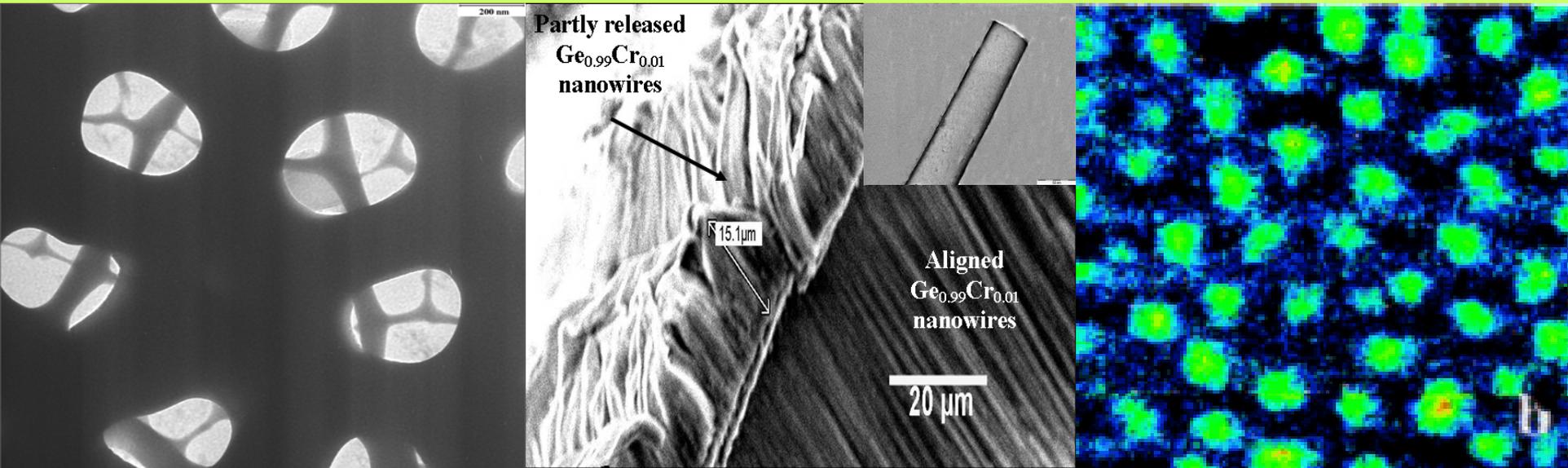
$$M(T) = M_0 (1 - BT^{3/2})$$

$$M(T) = M_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{R}{r_s} \right)^3 \ln^3 \frac{JS(S+1)}{T} \right] \right\}$$

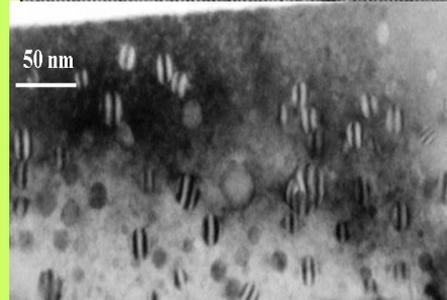
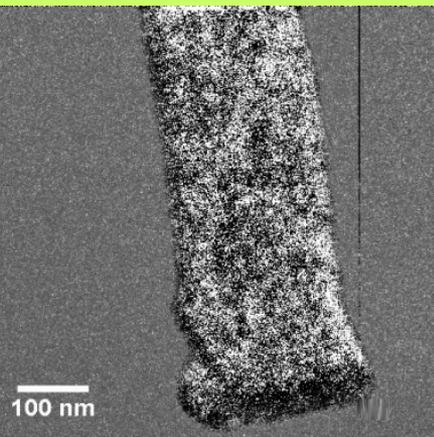
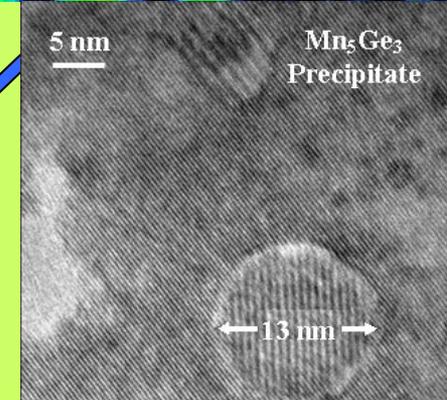
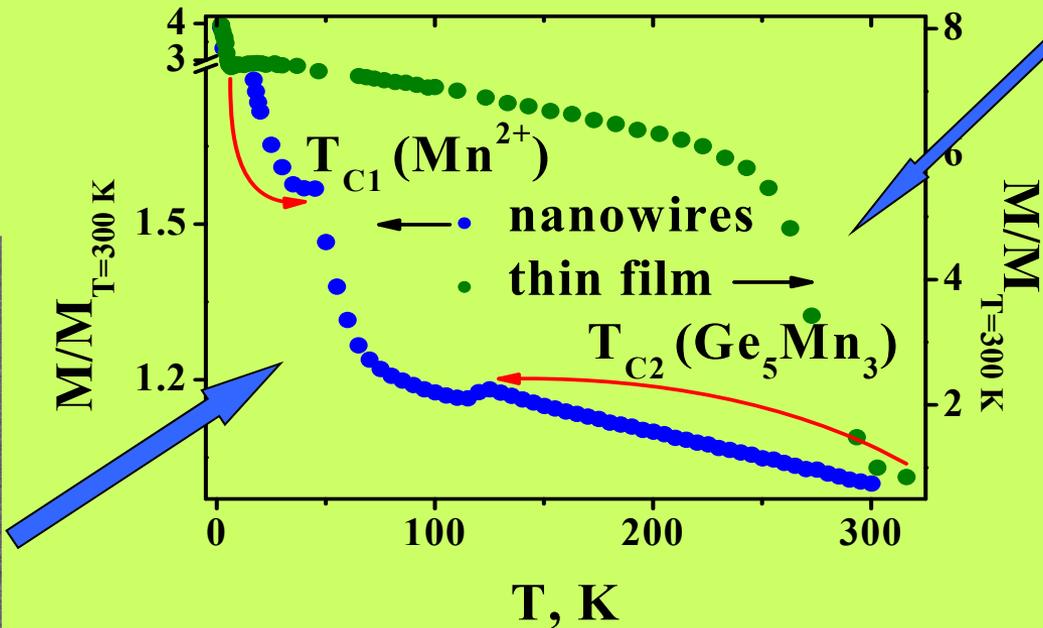
$$J = 72.3 \text{ мЭВ}$$

$$T_c = 30.3 \text{ K}$$

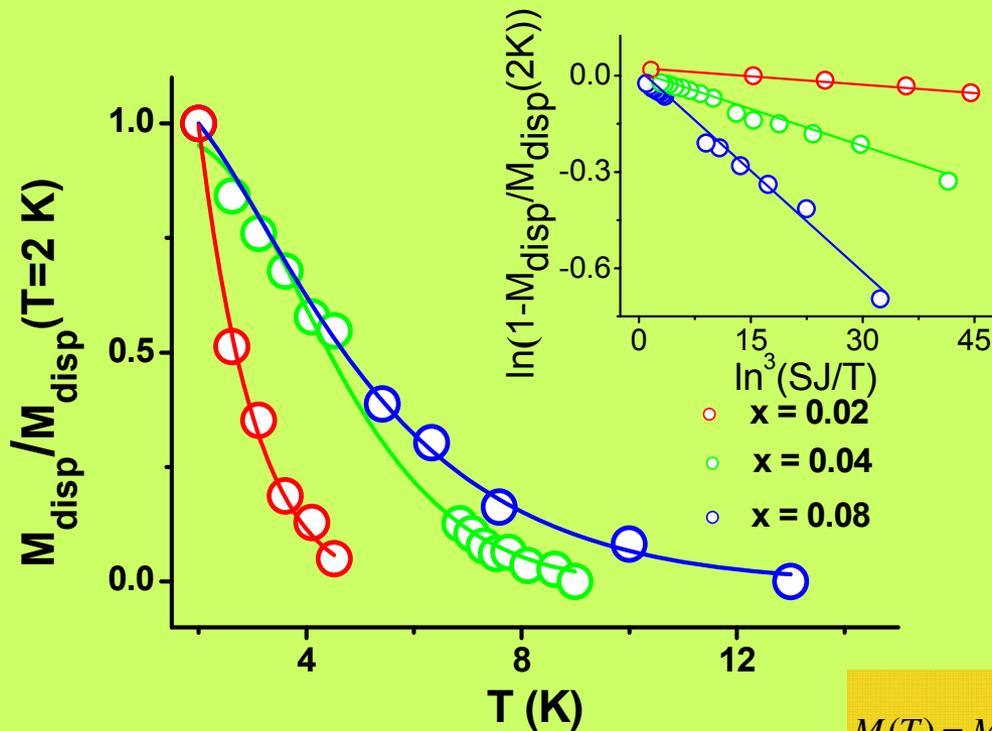
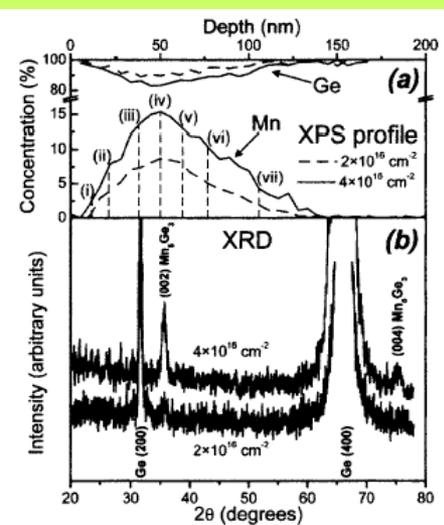
Ферромагнетизм в нанопроволоках и нанопленках Ge:Mn



$\varnothing \approx 30\text{-}100\text{ nm}$, $L \approx 60\text{ }\mu\text{m}$,
Плотность $\geq 10^{12}\text{ cm}^{-2}$

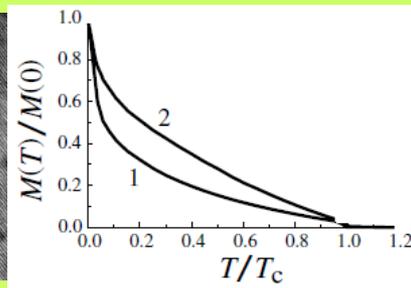


Перколяционный механизм ферромагнетизма в нанопленках Ge:Mn



$M_0 = M(T = 2 \text{ K})$
 R – радиус потенциала обменного взаимодействия ($\sim 10 \text{ \AA}$)
 r_s – среднее расстояние между ионами Mn^{2+} ($\sim 10 \text{ \AA}$)
 J – обменный интеграл ($\sim 60 \text{--} 10 \text{ K}$)
 $S = 5/2$ – спин ионов Mn^{2+}

$$M(T) = M_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{R}{r_s} \right)^3 \ln^3 \frac{JS(S+1)}{T} \right] \right\}$$



VOLUME 88, NUMBER 24 PHYSICAL REVIEW LETTERS 17 JUNE 2002

Polaron Percolation in Diluted Magnetic Semiconductors

A. Kaminski and S. Das Sarma

Зависимости магнитного момента M подсистемы диспергированных ионов Mn^{2+} в пленках $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ ($x = 0,02; 0,04; 0,08$) от температуры T при ориентации магнитного поля напряженностью $H = 1 \text{ кОе}$ перпендикулярно плоскости пленки (сплошными линиями показана аппроксимация)

Исследование магнитооптики гетероструктур $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\delta\text{-}\langle\text{Mn}\rangle$

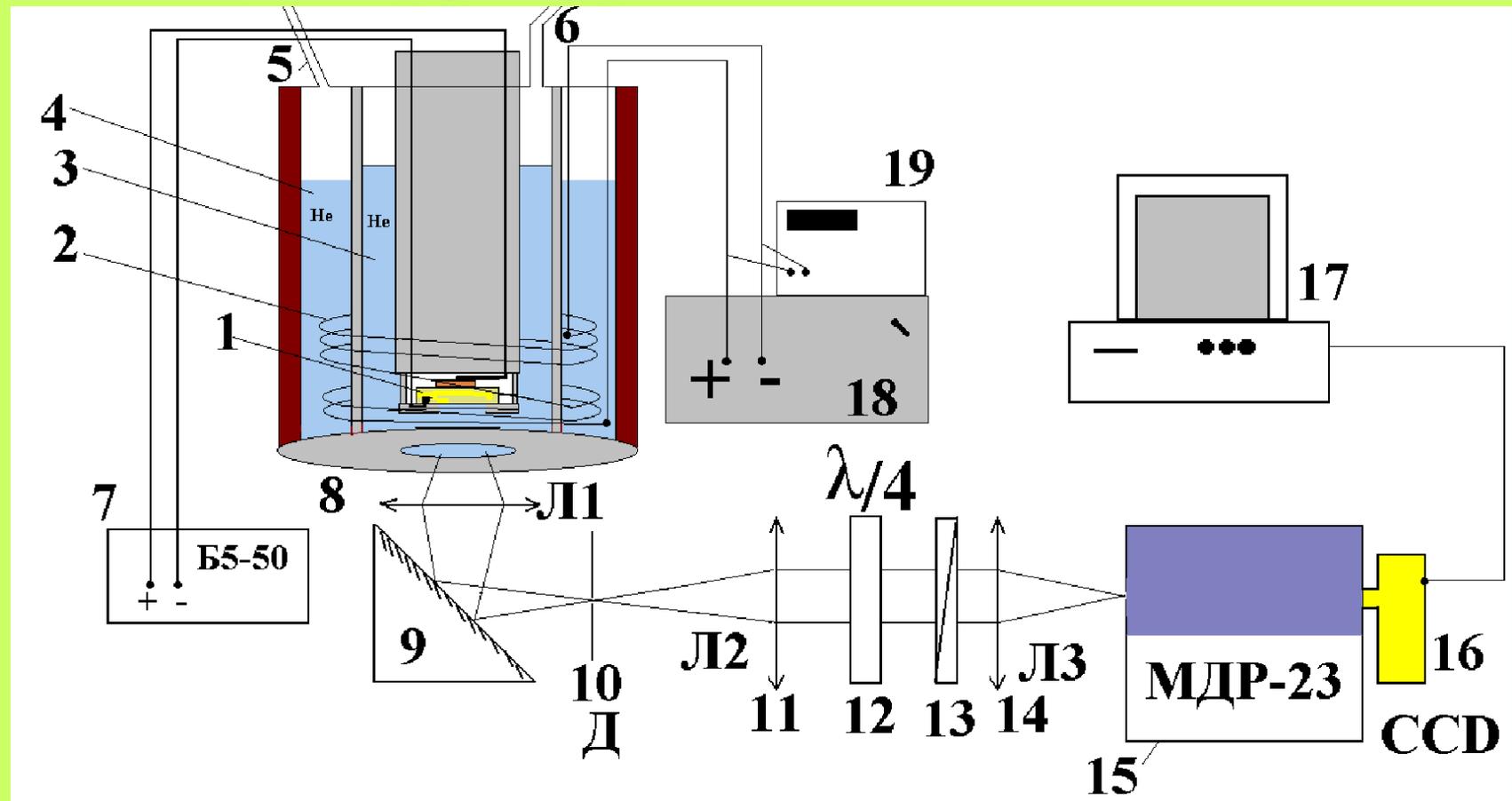
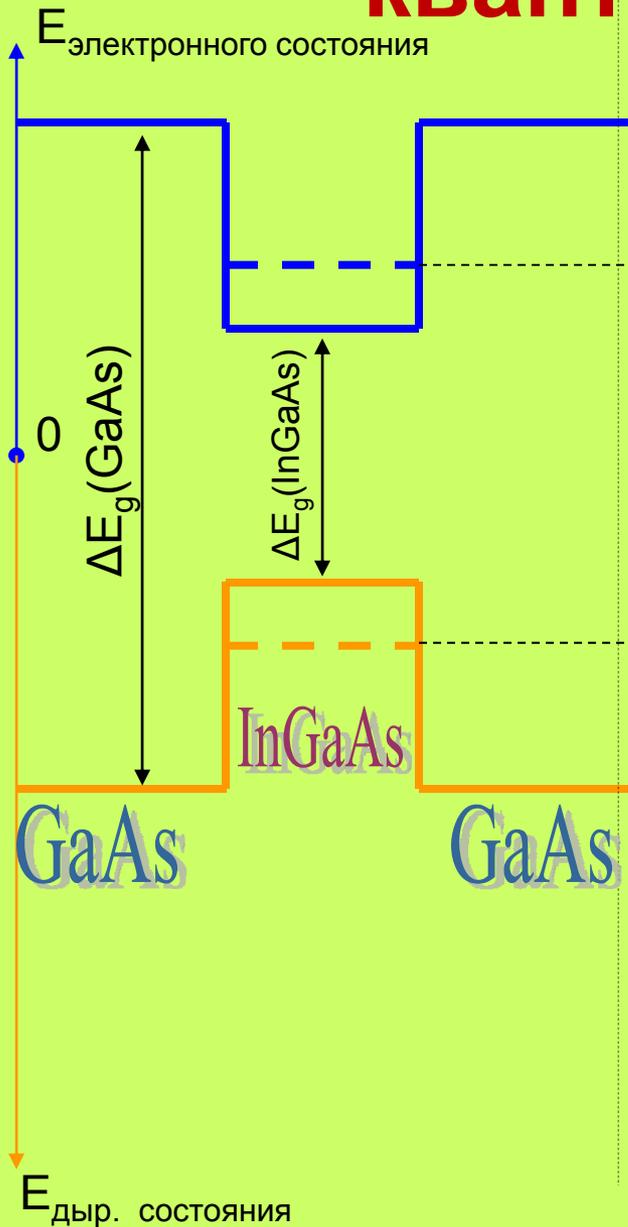


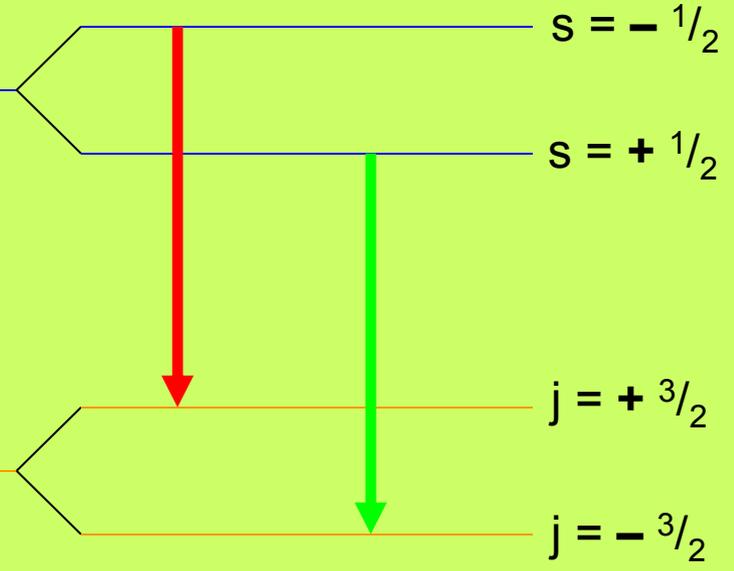
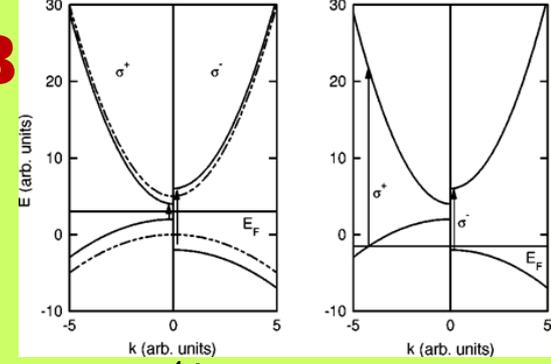
Схема установки : 1 - Исследуемая структура; 2 - Обмотки соленоида сверхпроводящего материала; 3 - Область криостата со сверхпроводящим магнитом, заполняемая жидким He; 4 - Рабочая область криостата, заполняемая жидким гелием; 5 - Выход He, испарившегося из области с соленоидом; 6 - Откачка He из рабочей области форвакуумным насосом; 7 - Источник тока, подаваемого на исследуемый образец; 8 - Фокусирующая линза1 (собирающая сигнал от образца на щель); 9 - Зеркало; 10 - Диафрагма; 11 - Промежуточная линза2 (создающая плоскопараллельный пучок света); 12 - Пластина в $\lambda/4$ - анализатор излучения; 13 - Поляризатор; 14 - Линза3 (фокусирующая сигнал на щель монохроматора); 15 - Монохроматор МДР-23; 16 - ПЗС-детектор; 17 - Персональный компьютер; 18 - Блок питания соленоида; 19 - Контроль напряжения на соленоиде

Электронные переходы в квантовой яме



$B = 0$

$B \neq 0$

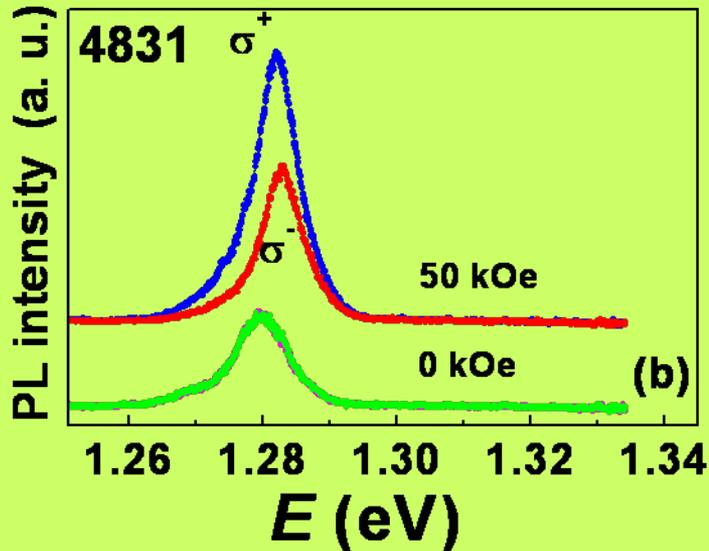
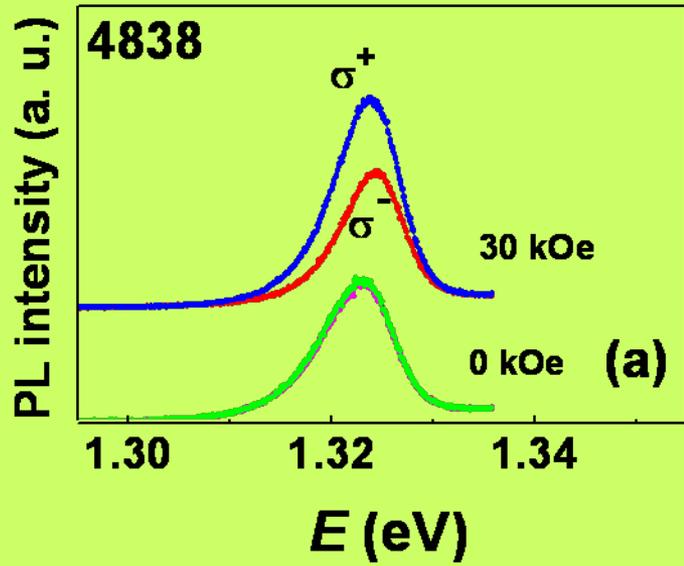


Правила отбора:
 $\Delta s + \Delta j = 1$

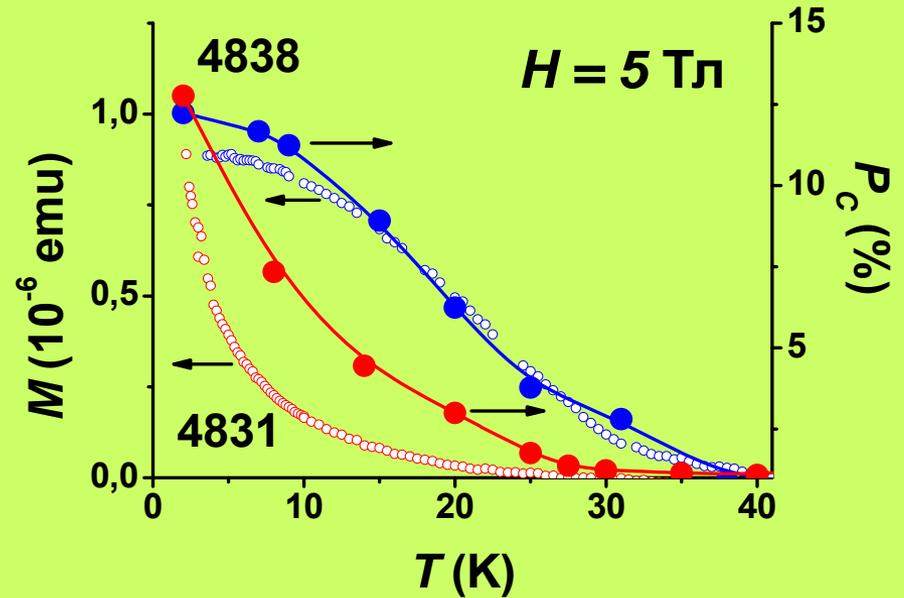
Переход с $\Delta s + \Delta j = -1$ – σ^- -поляризованный свет
 Переход с $\Delta s + \Delta j = +1$ – σ^+ -поляризованный свет

$$P_c = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)$$

Поляризованная фотолюминесценция гетероструктур InGaAs/GaAs/ δ -<Mn>

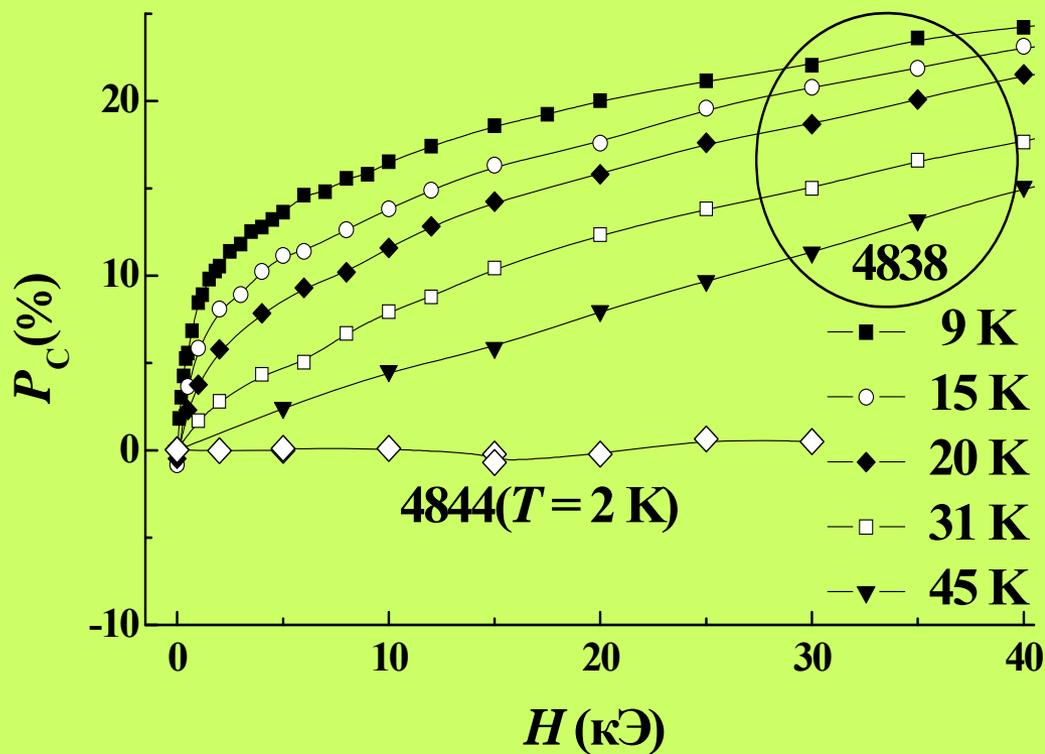


$$P_C = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$



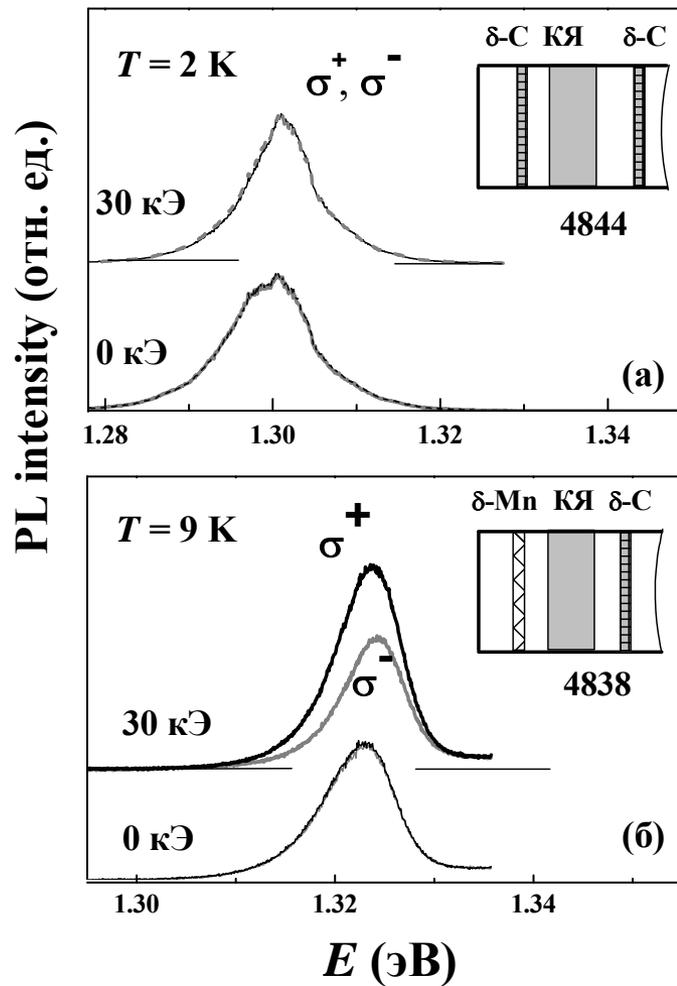
$$P_C = th\left(\frac{g\mu_B(H + 4\pi M)}{2k_B T}\right)$$

Зависимость циркулярной поляризации в сингулярном образце от магнитного поля



Зависимости степени циркулярной поляризации P_C в образцах 4844 (с δ -<C>-слоем вместо δ -<Mn>) и 4838 (с δ -<Mn>-слоем) от магнитного поля H при различных температурах.

Имитация марганцевого слоя углеродным слоем



Спектры фотолюминесценции для образца 4844 (с δ -<C>-слоем вместо δ -<Mn>) при $T = 2$ К (а) и образца 4838 (с δ -<Mn>-слоем) при $T = 9$ К (б) в магнитных полях $H = 0$ кЭ и 30 кЭ. На врезках схематически изображены гетероструктуры, содержащие квантовую яму (КЯ), δ -<C>-слой углерода и δ -<Mn>-слой марганца.

Выводы

- В сингулярных гетероструктурах на основе GaMnAs температурная зависимость магнитного момента описывается формулой Блоха «три вторых». В вицинальных – имеет плавный не блоховский ход, описываемый в рамках теории протекания для неупорядоченных ферромагнетиков. Характер температурной зависимости намагниченности марганцевого слоя сходен с температурной зависимостью поляризации фотолюминесценции из квантовой ямы.
- Слою марганца отвечает линия ферромагнитного резонанса с полем анизотропии ≈ 600 Эрстед. Неоднородность распределения ионов марганца в вицинальной гетероструктуре приводит к уширению линий ферромагнитного резонанса и смещению характерного пика фотолюминесценции из квантовой ямы.
- В спектрах электронного спинового резонанса в вицинальной гетероструктуре обнаружена нерезонансная линия, которая связана с микроволновым магнетосопротивлением в слое.
- В нанопленках и нанопроволоках GeMn наблюдаются магнетосопротивление и перколяционный магнетизм, делая германий перспективной основой для создания гетероструктур.

Спасибо за внимание!

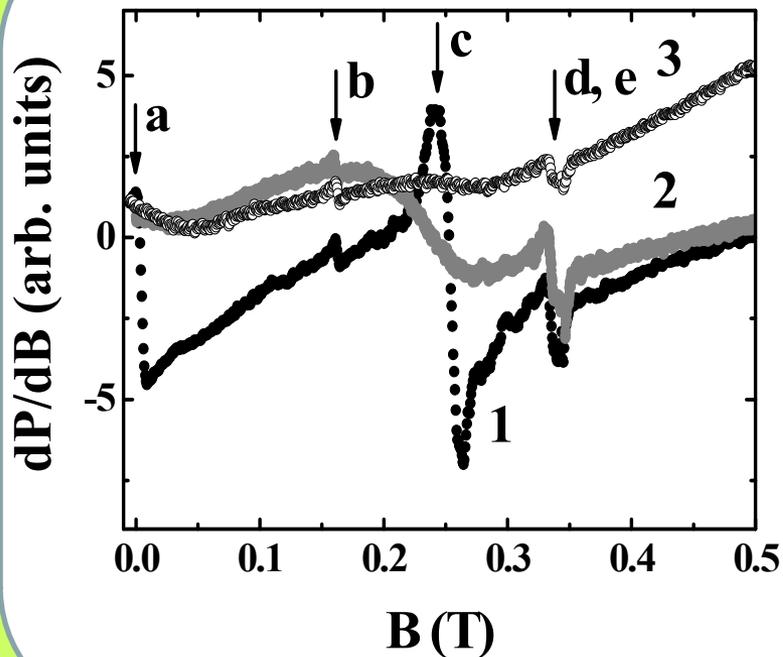
Работа частично поддержана программой Президиума РАН № 27 «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов».

Руководитель академик Алдошин С.М.

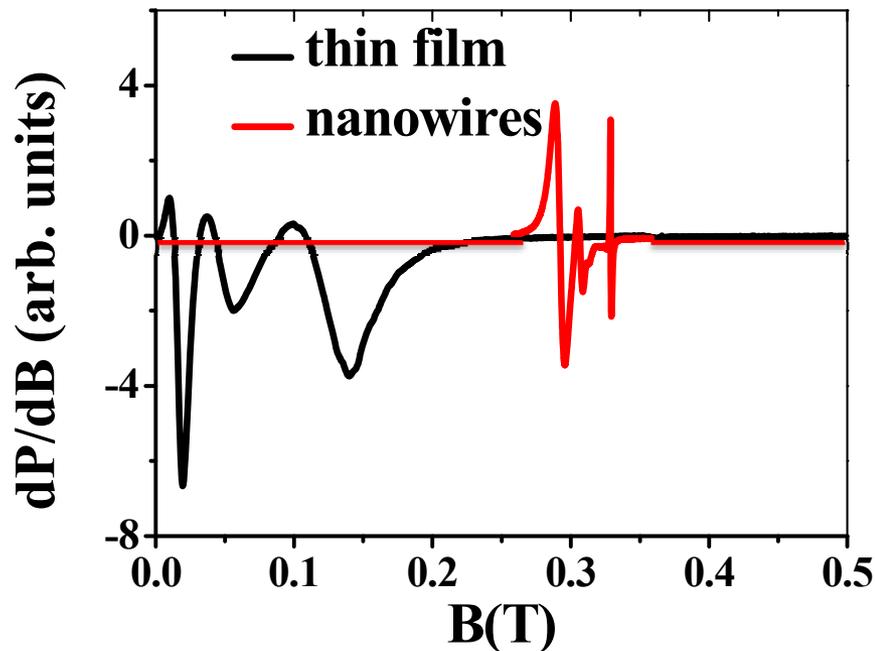
Авторы признательны сотрудникам Научно-исследовательского физико-технического института Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского М. В. Дорохину, Ю. А. Данилову, и Б. Н. Звонкову за образцы, предоставленные для исследований.

Аронзону Б., Казаковой О., Фарле М., Жихареву А. за обсуждение полученных результатов.

Электронный спиновый резонанс



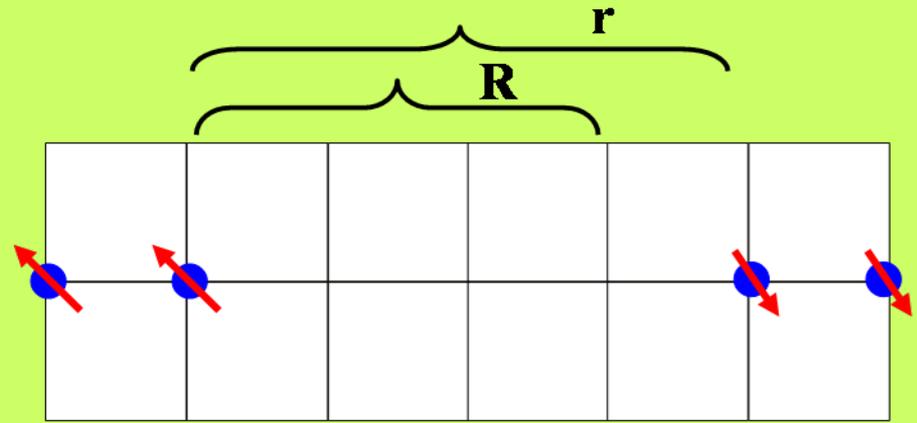
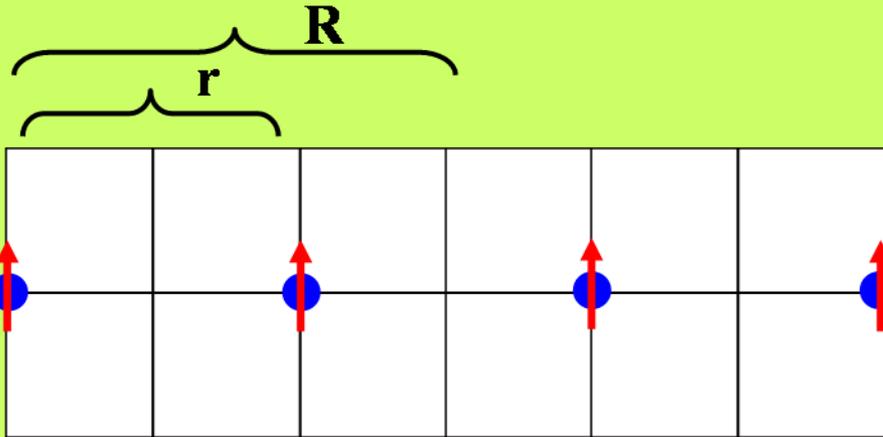
ЭСР в гетероструктурах
InGaAs/GaAs/ δ -Mn при $T = 4$ К.



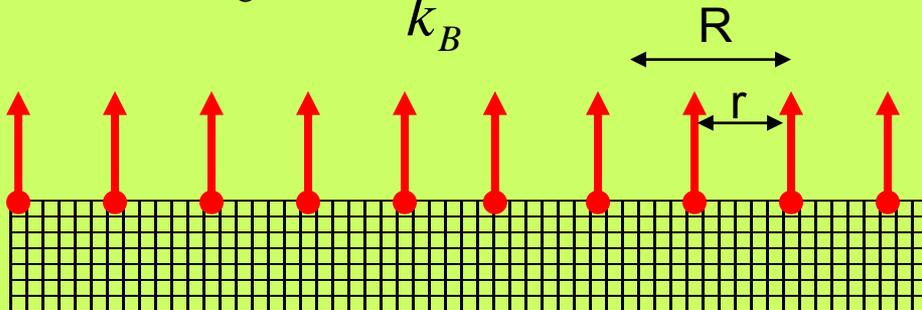
Ферромагнитный резонанс в
нанопроволоках и нанопленках Ge:Mn

Особенности обменного взаимодействия в гетероструктурах InGaAs/GaAs/ δ -<Mn> на сингулярных и вицинальных гранях GaAs

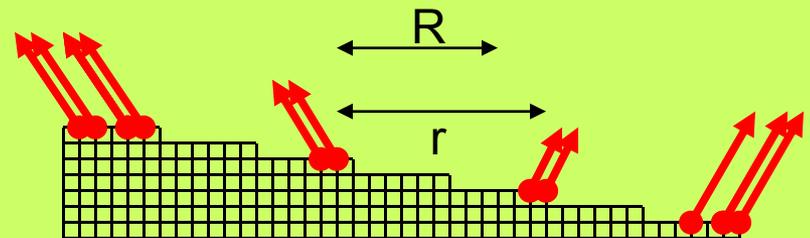
$$R/r_S = L \cdot n_h^{1/3} \longrightarrow n_h \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \longrightarrow L = a_B = 7.8 \text{ \AA}$$



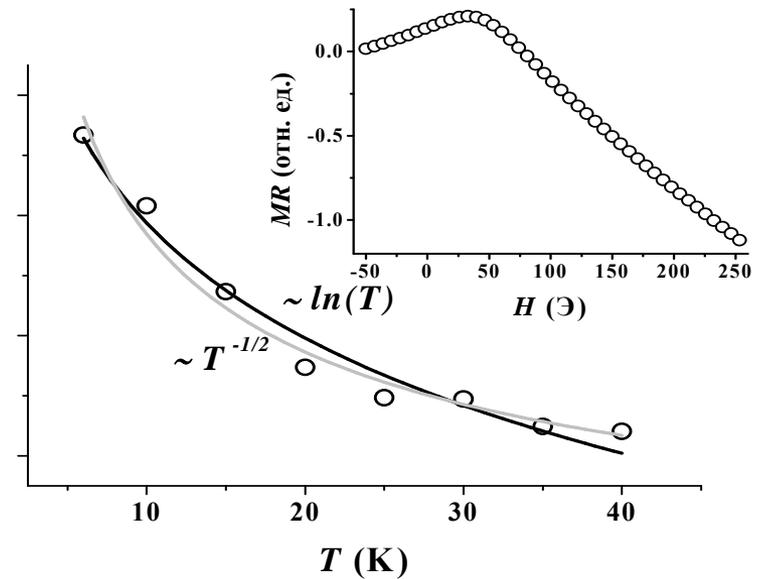
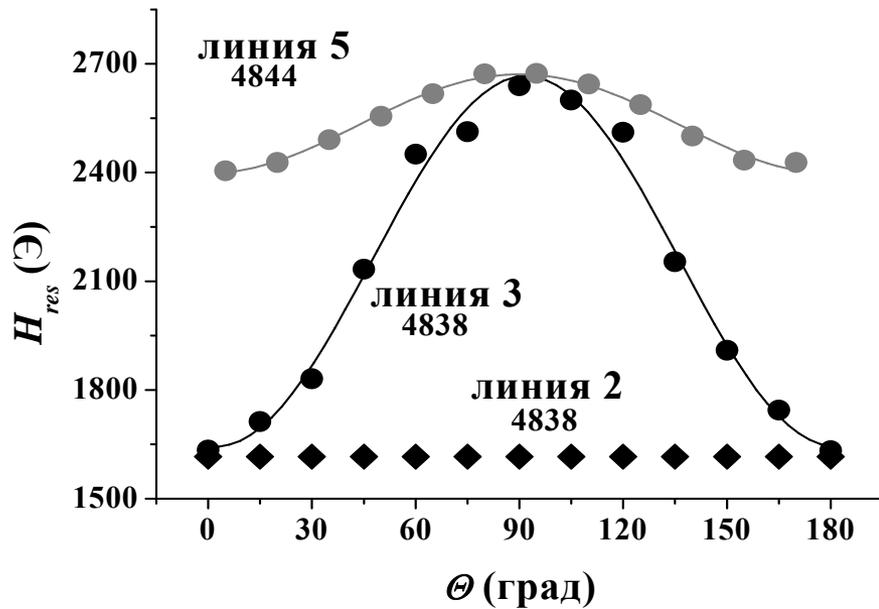
$$T_C = \frac{S(S+1)}{k_B} J$$



$$T_C = JS(S+1) \exp\left(-\frac{0.87r_S}{R}\right)$$



Аксиальная анизотропия линии ФМР и микроволновое магнитосопротивление

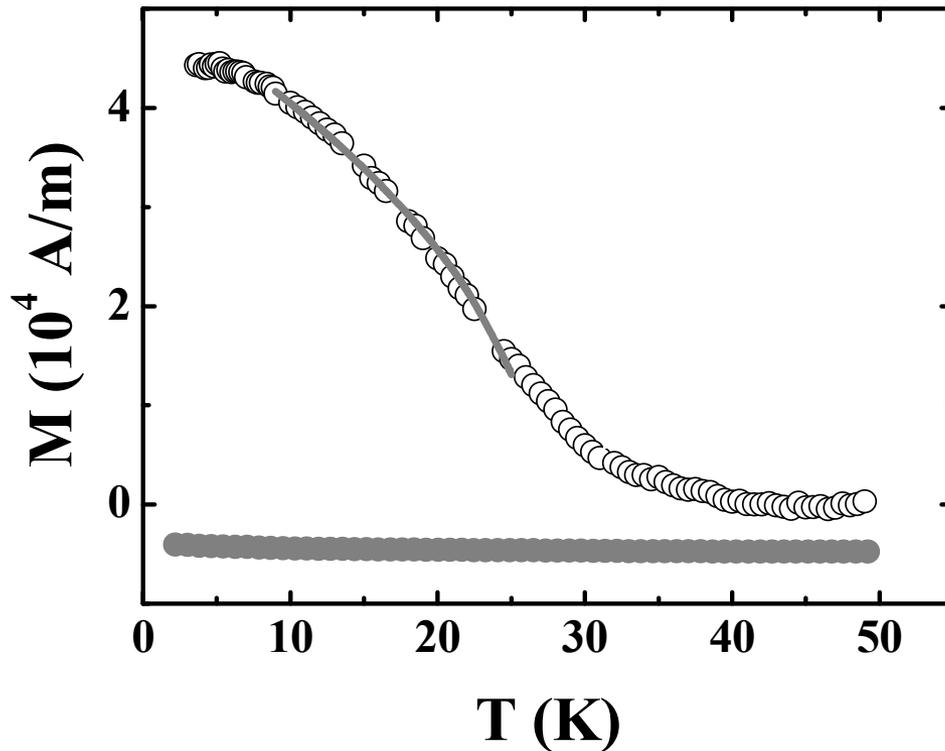


Ориентационные зависимости резонансного поля H_{res} линии 3 при температуре $T = 4$ К и изотропной линии 2 при $T = 4$ К спектра электронного спинового ренонса в образце 4838 (с δ -<Mn>-слоем) при температуре $T = 20$.

Зависимость интенсивности линии 1 в нулевом магнитном поле от температуры T образца 4838 (с δ -<Mn>-слоем).

На вставке - зависимость поглощения (интеграл линии 1) от магнитного поля $MR(H)$ при $T = 4$ К.

Магнитное упорядочение в сингулярных образцах



Сплошными линиями показана аппроксимация зависимости $M(T)$ для сингулярных образцов, состоящая из 2-х компонент:

- 1) При низких T -рах 2-10 K законом Блоха
- 2) При высоких T -рах с помощью теории среднего поля
 $M(T) \sim M_0(1-T/T_C)^{1/2}$

Температурная зависимость намагниченности сингулярных образцов с GaAs:Mn слоем и контрольного образца без GaAs:Mn слоя при $H = 1$ kOe.

Сплошная линия - аппроксимация.

Магнитное поле приложено в плоскости (001) GaAs. Диамагнитный вклад от матрицы GaAs вычтен.

Погрешность измерения ($\pm 0.2 \cdot 10^4$ A/m) приблизительно равна размеру точек.

Магнитные характеристики гетероструктур InGaAs/GaAs/ δ -<Mn>

Типы образцов Физические свойства	4838	$\text{Ga}_{0.949}\text{Mn}_{0.051}\text{As}$	4831	$\text{Ga}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{As}$
		$\text{Ga}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{As}$		
$M_{sp} \text{ } \varnothing$	30 ± 4	290 ± 40	50 ± 7	-
		16.5		
$J, \text{ мэВ}$	0.18 ± 0.04	1	0.72 ± 0.04	15
		-		
$(T_C)_{\text{measure}}, \text{ K}$	35 ± 5	87 ± 5	30 ± 5	100
		37 ± 3		
$(T_C)_{\text{calculate}}, \text{ K}$	35 ± 8	-	5 ± 1	10
		-		
$B, 10^{-3} \text{ K}^{-3/2}$	5.3 ± 0.1	-	-	-
		3.2 ± 0.1		
$D, 10^9 \text{ } \varnothing \cdot \text{ см}^2$	0.36 ± 0.07	1 ± 0.4	-	-
$D, \text{ мэВ} \cdot \text{ \AA}^2$	21 ± 4	66		
R/r_S	-		0.21 ± 0.03	0.1-0.001
$L, \text{ \AA}$	-		6.5 ± 0.9	-

$$B = 2.612 \frac{g\mu_B}{M_0} \left(\frac{k_B}{4\pi D} \right)^{3/2} \quad J = \frac{Dg\mu_B}{2Sr_S^2} \quad r_S = \left(\frac{4\pi\chi n}{3} \right)^{-1/3}$$

Зонная структура GaMnAs

PHYSICAL REVIEW B

VOLUME 59, NUMBER 20

15 MAY 1999-II

Antiferromagnetic p - d exchange in ferromagnetic $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ epilayers

J. Szczytko, W. Mac, and A. Twardowski

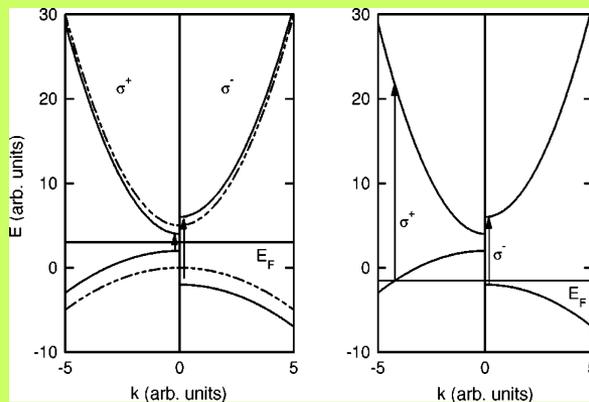
Institute of Experimental Physics, Warsaw University, Hoza 69, 00681 Warsaw, Poland

F. Matsukura and H. Ohno

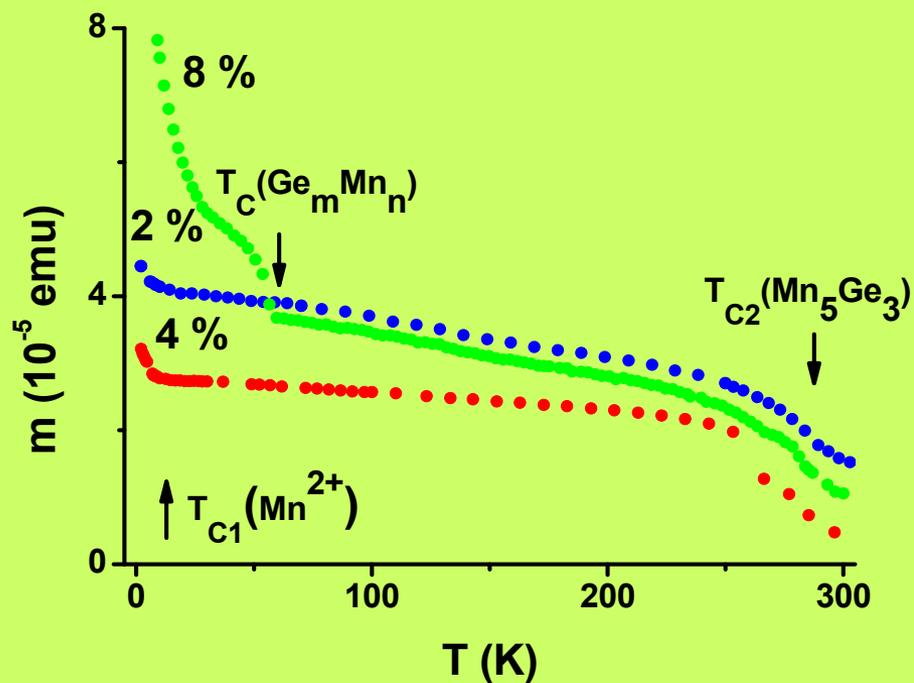
Laboratory for Electronic Intelligent Systems, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

Схема зонной структуры $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$.

Показаны зона проводимости, валентная зона дырок, расщепленные ферромагнитным s - d обменом и антиферромагнитным p - d обменом. Зоны в отсутствие обмена показаны пунктиром. Оптические переходы с уровней s_1 и с s_2 показаны для случая низкой дырочной концентрации.

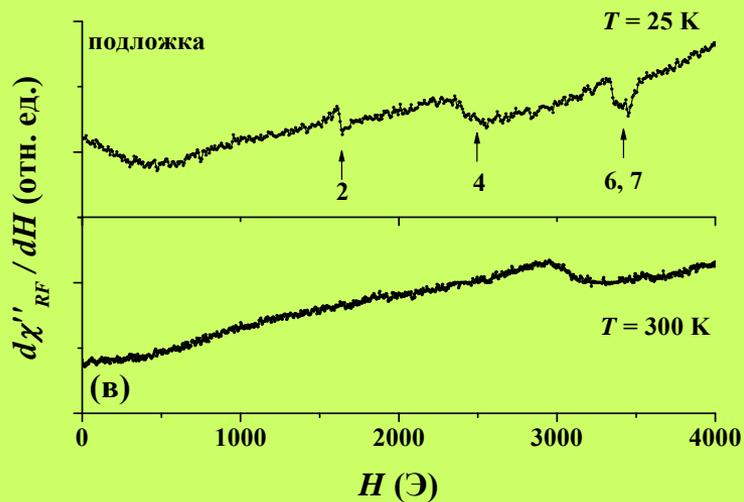
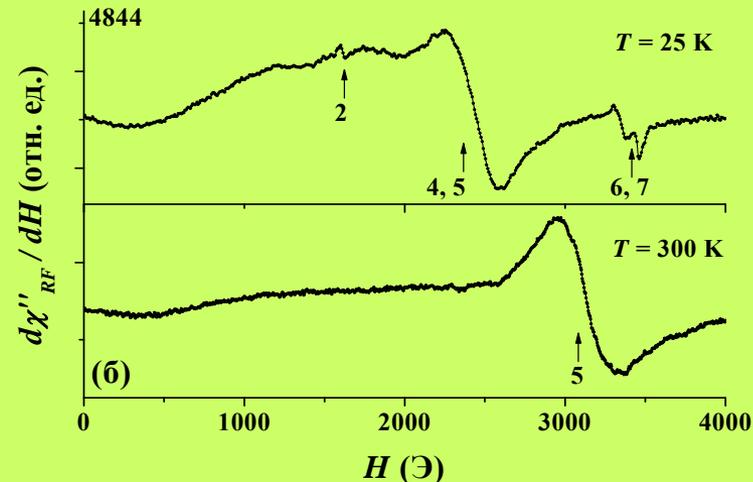
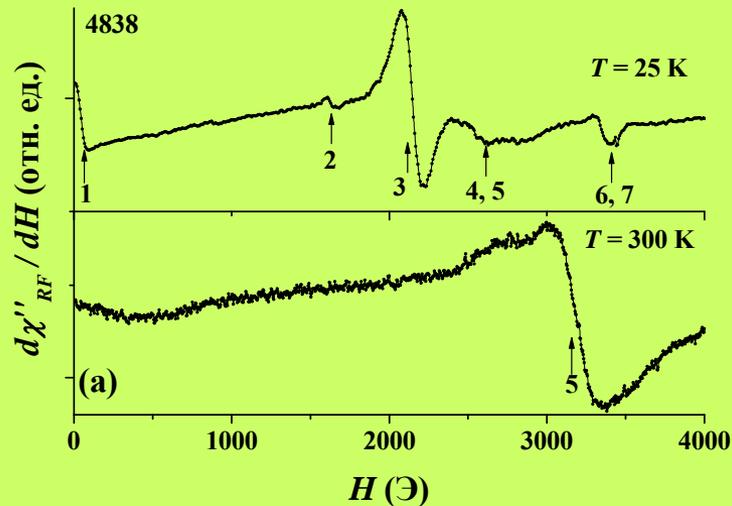


Ферромагнетизм в нанопленках Ge:Mn



x_{Mn} , at. %	T_{C1} , K	T_{C3} , K
2	5	270
4	9	279
8	13	286

Различные источники линий ЭПР в сингулярных гетероструктурах



(а) Спектры электронного спинового резонанса в образце 4838 (с δ -<Mn>-слоем) при температурах $T = 15$ К и 300 К. Угол между постоянным полем спектрометра и плоскостью образцов (слоями гетероструктуры) $\Theta = 135^\circ$. (б) Спектры электронного спинового резонанса в образце 4844 (с δ -<C>-слоем вместо δ -<Mn>) при температурах $T = 15$ К и 300 К при $\Theta = 0^\circ$. (в) Спектры электронного спинового резонанса в подложке GaAs при температурах $T = 15$ К и 300 К при $\Theta = 0^\circ$. Цифрами обозначены линии в спектре.

Поляронные перколяции в магнитных полупроводниках

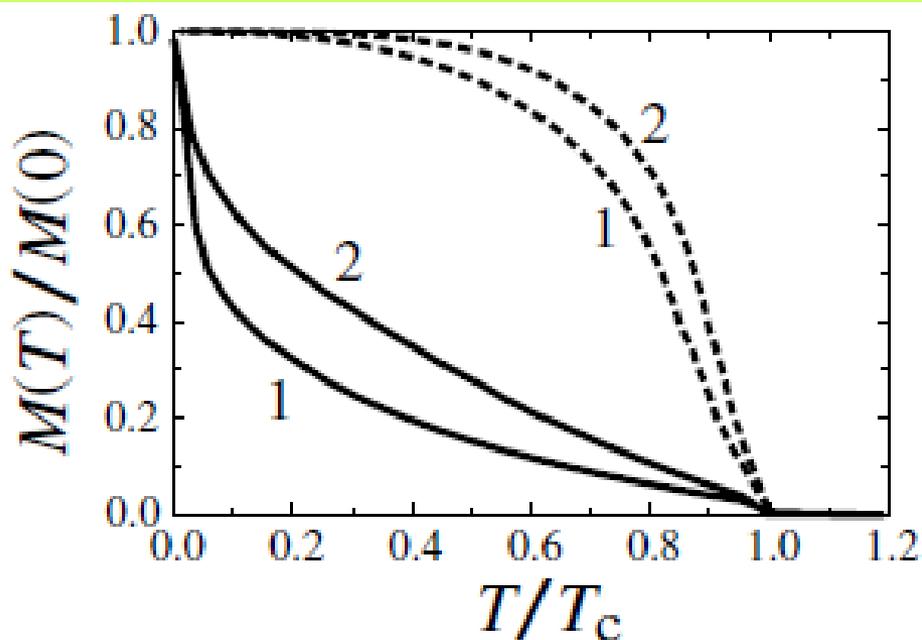
VOLUME 88, NUMBER 24

PHYSICAL REVIEW LETTERS

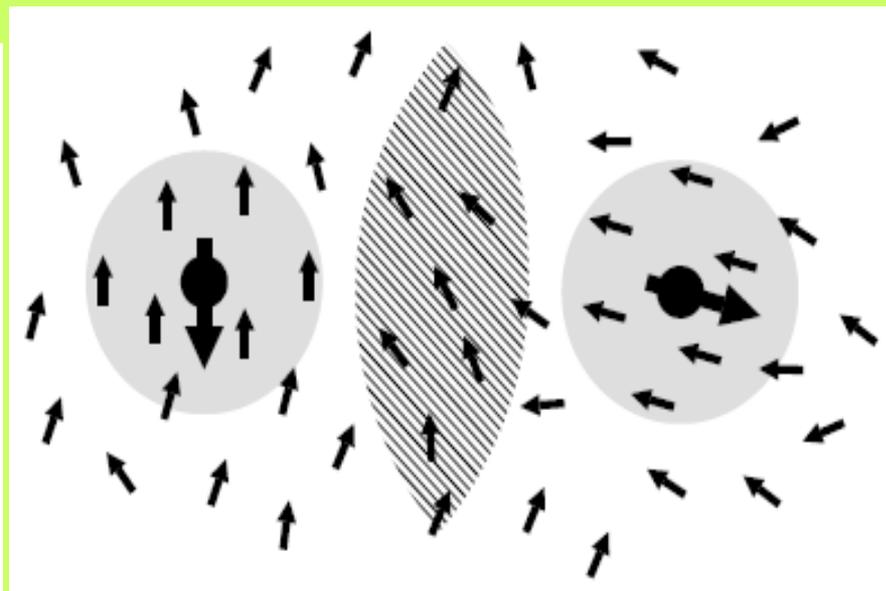
17 JUNE 2002

Polaron Percolation in Diluted Magnetic Semiconductors

A. Kaminski and S. Das Sarma



Сплошные линии показывают относительную намагниченность для концентрации магнитных ионов $a_B^3 n_h = 10^{-3}$ (кривая 1) и 10^{-2} (кривая 2). Пунктирная линия показывает относительную намагниченность локализованных дырок с малым вкладом в общую намагниченность образца



Взаимодействие двух связанных магнитных поляронов (показаны серыми областями) Маленькими стрелками показаны спины примесных ионов, большими – спины дырок.

Образование перколяционного ферромагнетика из отдельных «островков» - поляронов

PHYSICAL REVIEW B 68, 235210 (2003)

Magnetic and transport percolation in diluted magnetic semiconductors

A. Kaminski and S. Das Sarma

