

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

Оксана Коплак<sup>1,2</sup>, Алексей Дмитриев<sup>2</sup>,  
Сергей Зайцев<sup>3</sup>, Роман Моргунов<sup>2</sup>

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

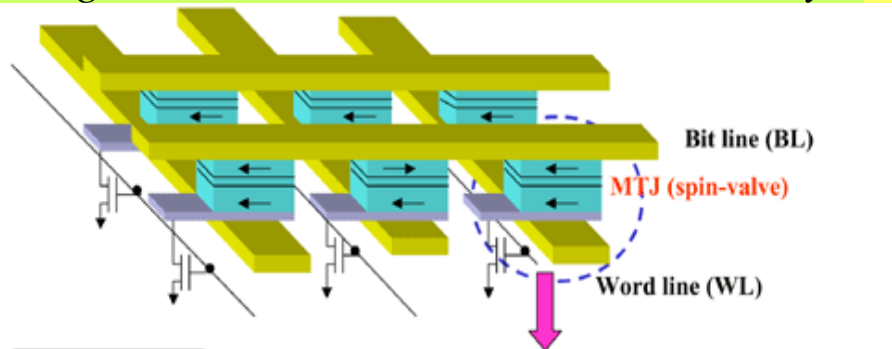


Всероссийская молодежная конференция  
«Успехи химической физики»  
21-23 июня 2011 г., Черноголовка

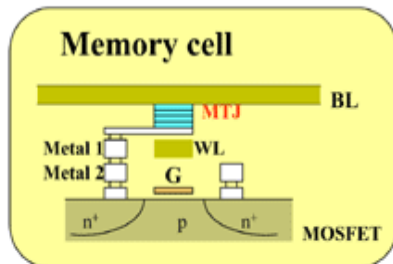
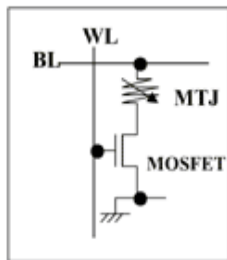


# Магнитные элементы для MRAM и SPIN-LED

*Magnetoresistive Random Access Memory*



- Nonvolatile
- High density
- High speed
- Infinite endurance



**Universal memory**

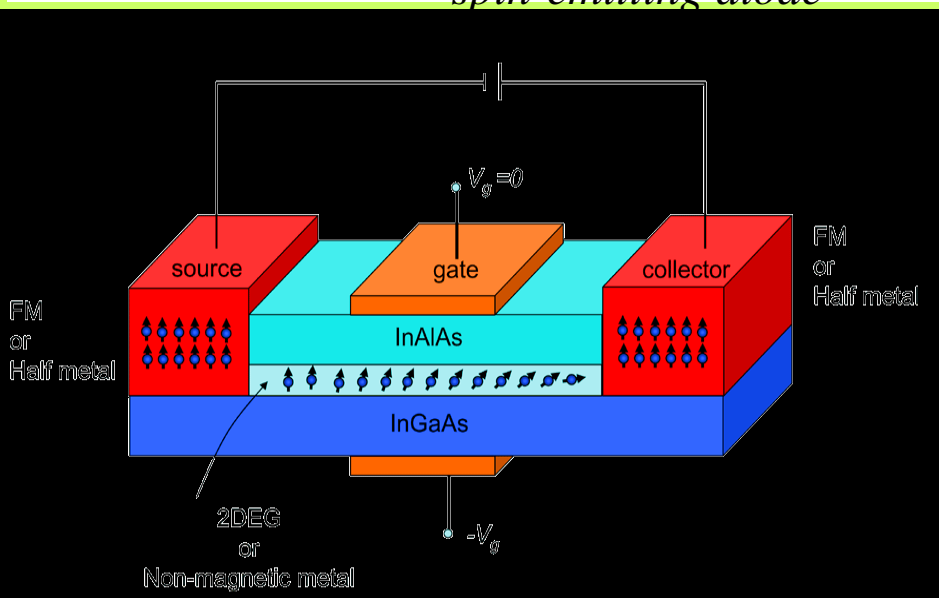
*spin-emitting diode*

## Гетероструктуры InGaAs/GaAs/ $\delta$ -<Mn>

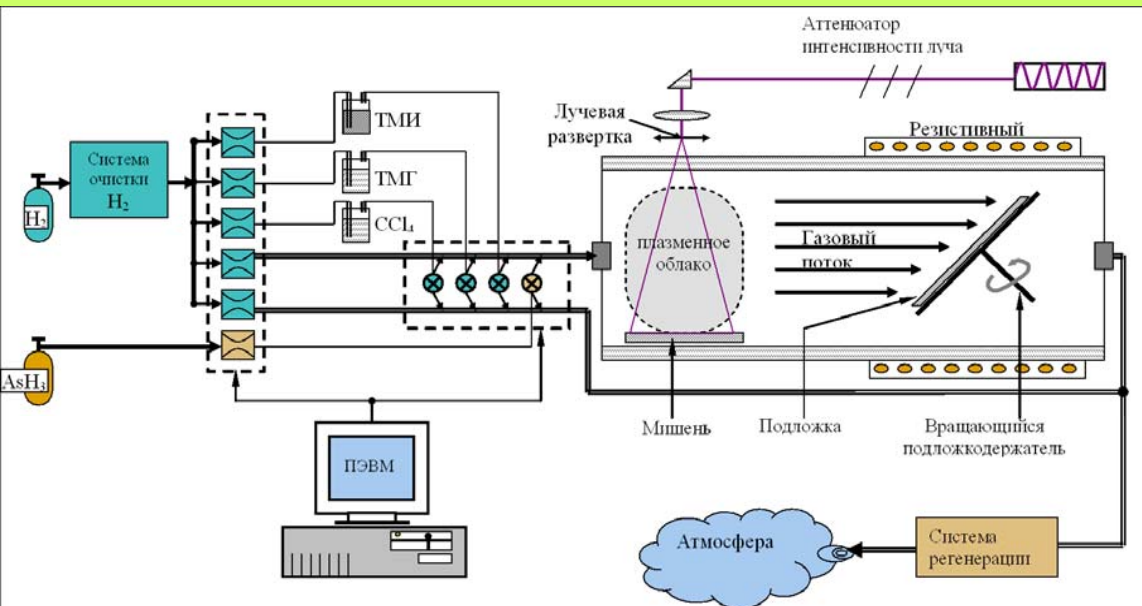
### нанопленки Ge:Mn

### нанопроволоки Ge:Mn

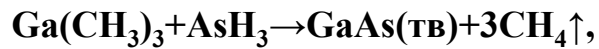
**Цель** исследований спиновой динамики гетероструктур – создание технологий управления их магнитными свойствами с помощью оптического и электрического воздействий на концентрацию и спиновую поляризацию носителей заряда в полупроводниках.







# Выращивание гетероструктур InGaAs/GaAs/ $\delta$ -<Mn>

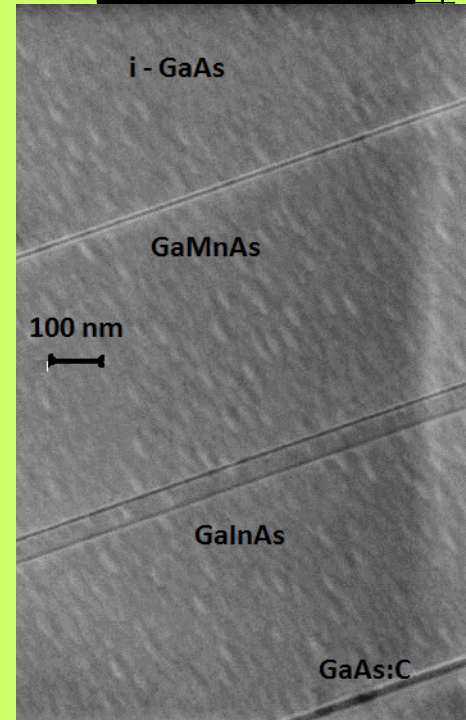
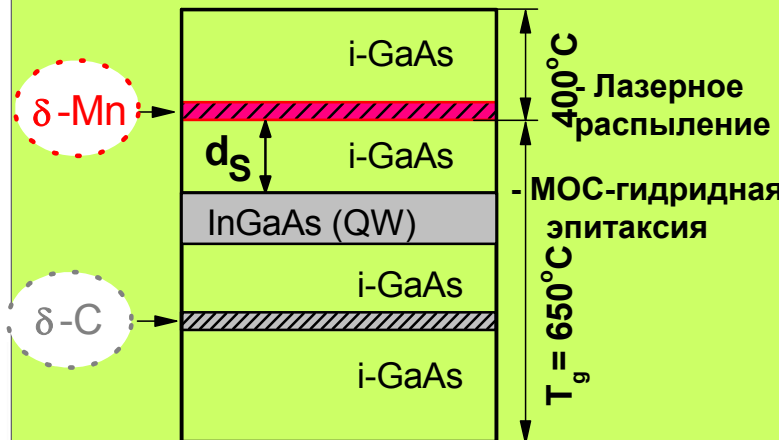


Реакция формирования GaAs  
в МОС-гидридном процессе:

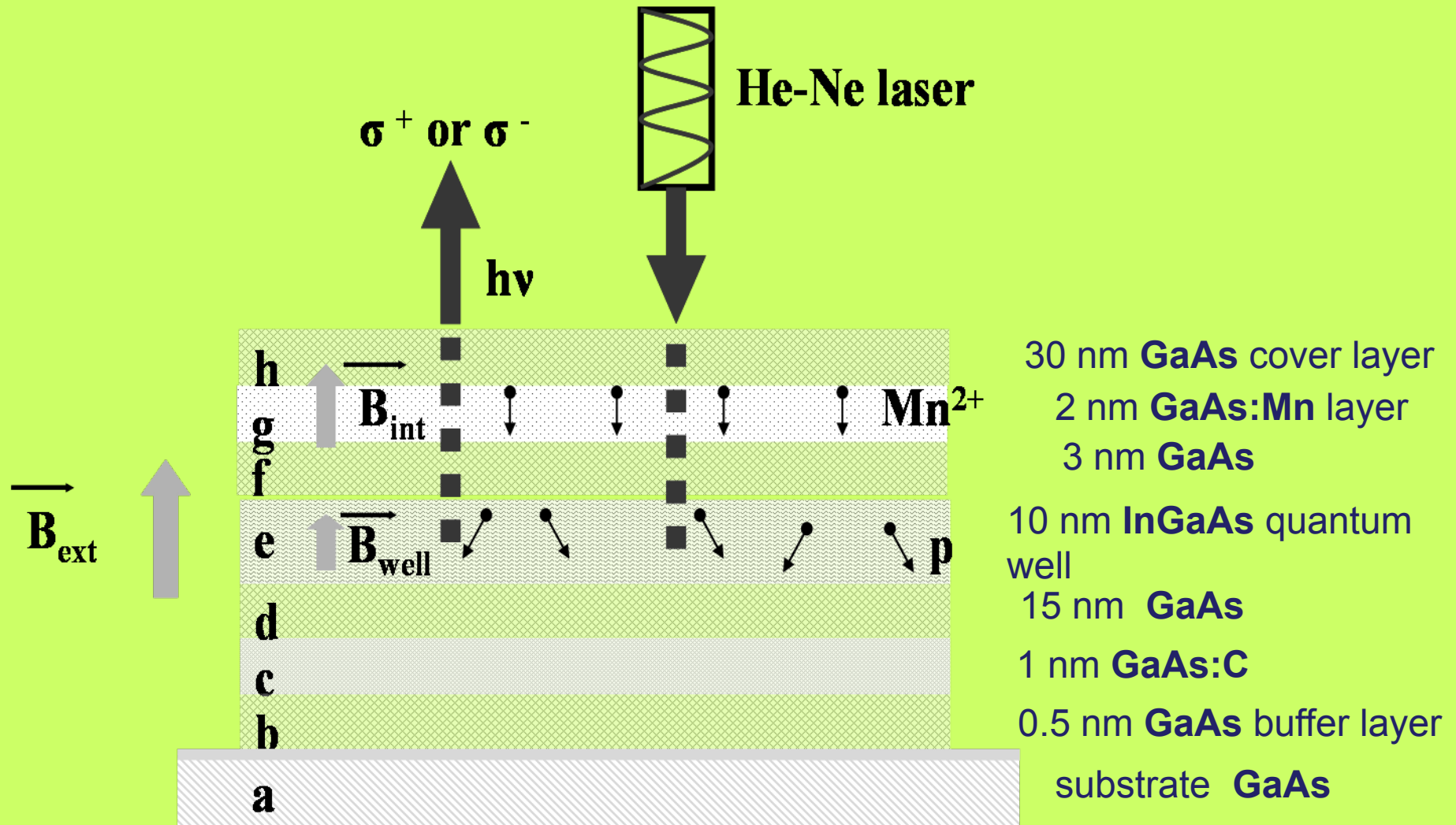


МОСГЭ+ Метод лазерного распыления

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

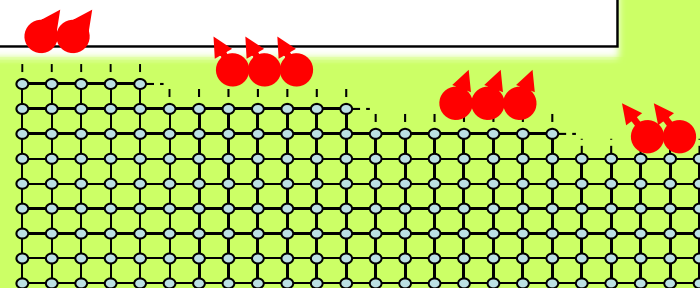
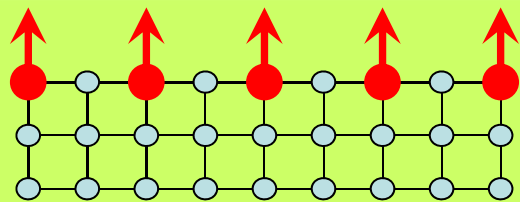
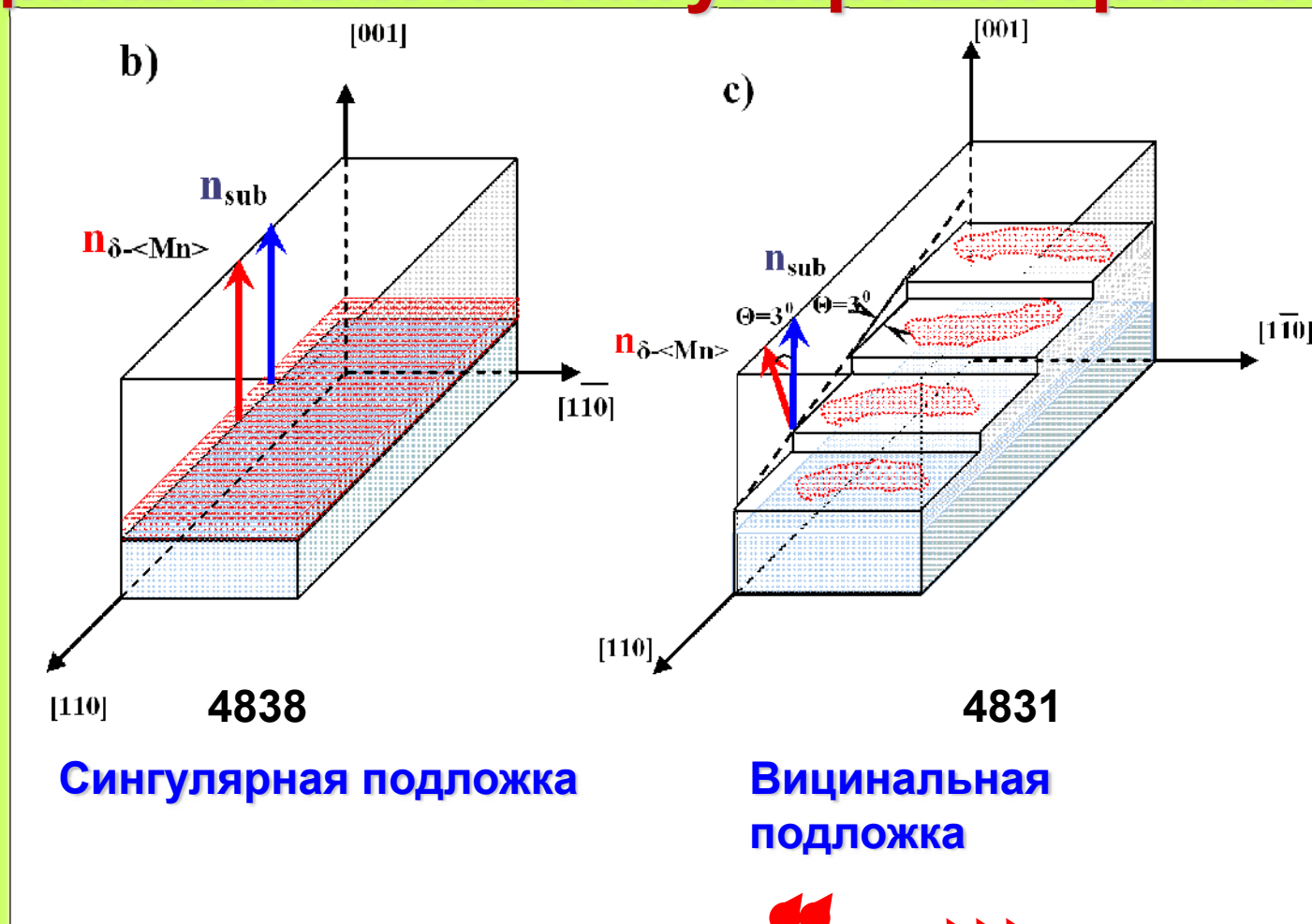


# Гетероструктуры InGaAs/GaAs/ $\delta$ -<Mn>



$\vec{B}_{ext}$  – 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/ $\delta$ -<Mn> на вицинальных и сингулярных гранях GaAs



# Исследование магнитных свойств. Методика



**MPMS 5XL Quantum Design**

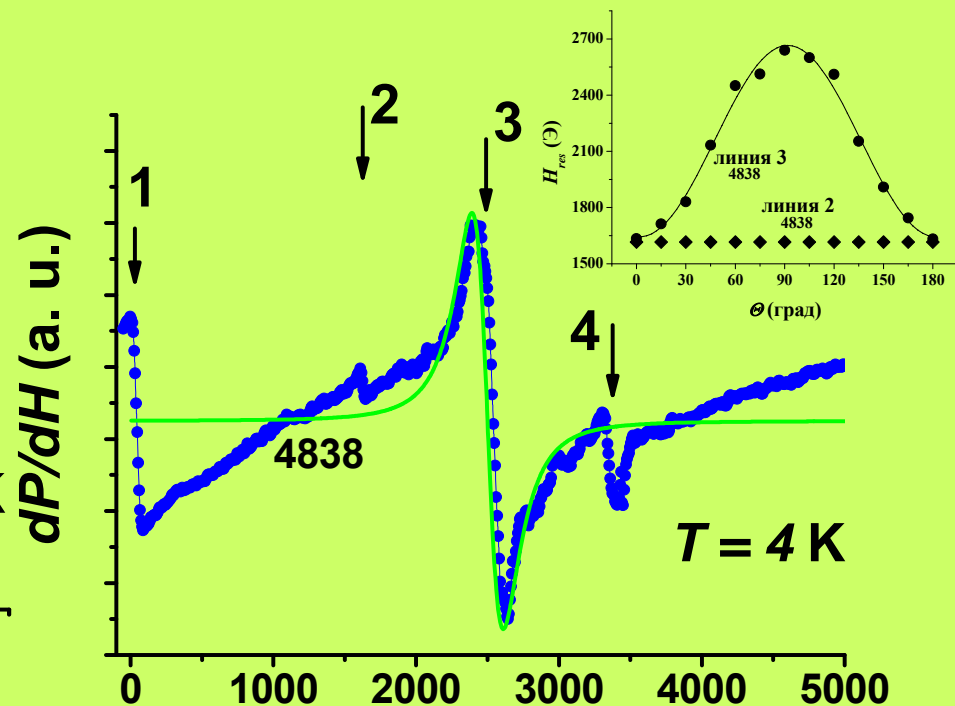
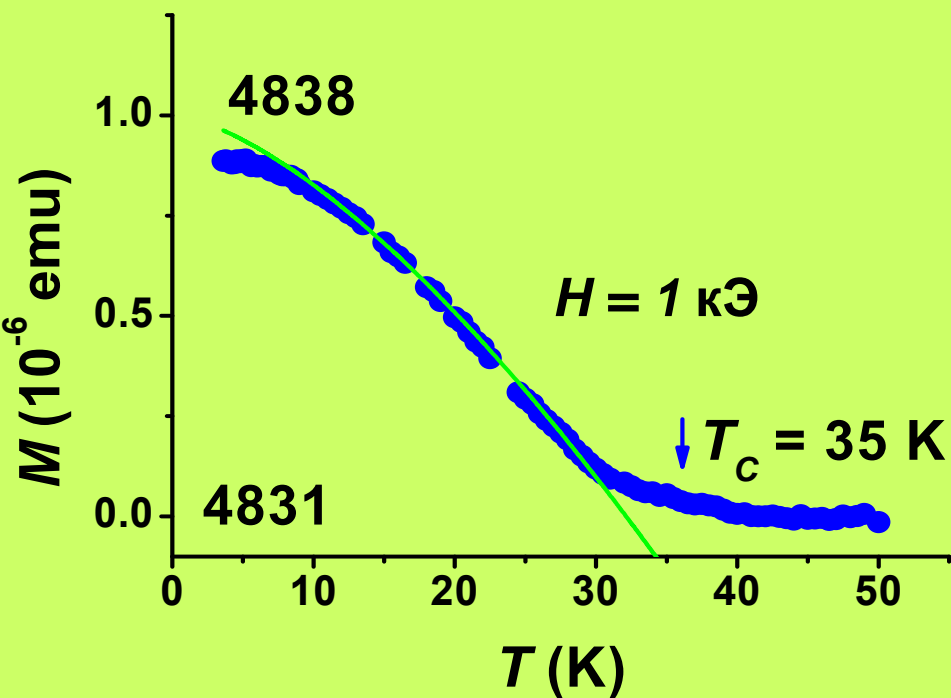
$T = 2 - 300 \text{ K}$ ,  $H = 1 \text{ кЭ}$



**Bruker E500,  
ESR 900 Oxford Instruments.**

X-диапазон частота  $\approx 9.65 \text{ ГГц}$ ,  
 $H = 0 - 14 \text{ кЭ}$

# Магнитное упорядочение в сингулярных образцах



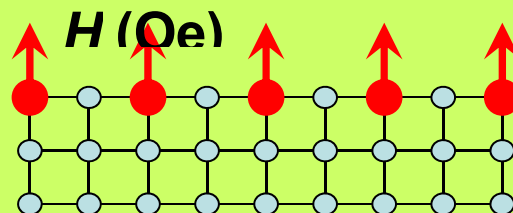
$$M(T) = M_0(1 - BT^{3/2})$$

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

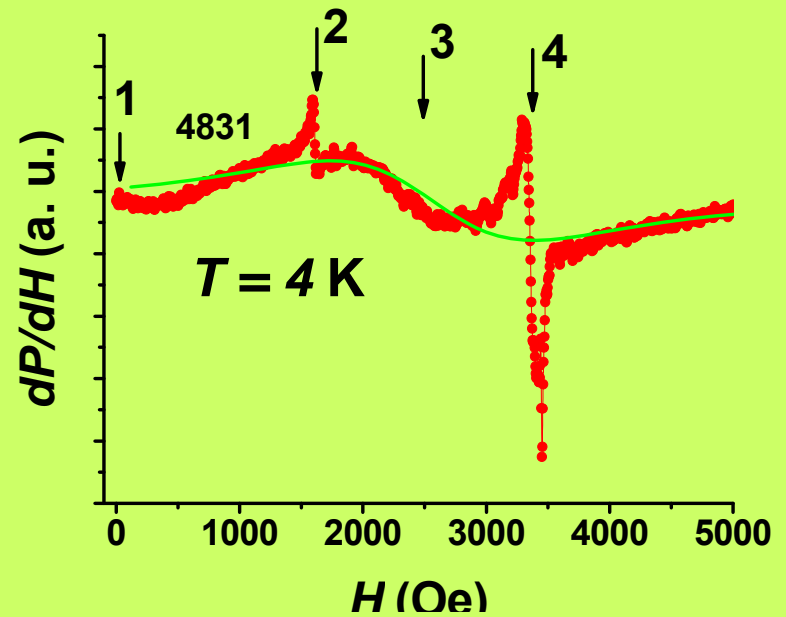
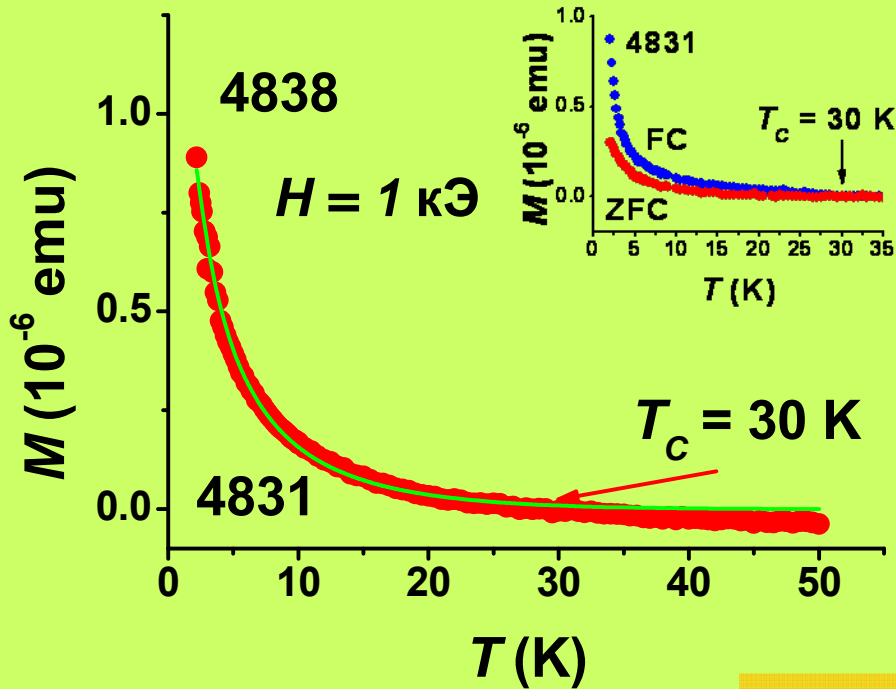
$$B = (5,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-3/2}$$

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

$$J = 18 \pm 3 \text{ мЭВ}$$



# 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  $\text{Ga}^{3+}$ ,

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

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

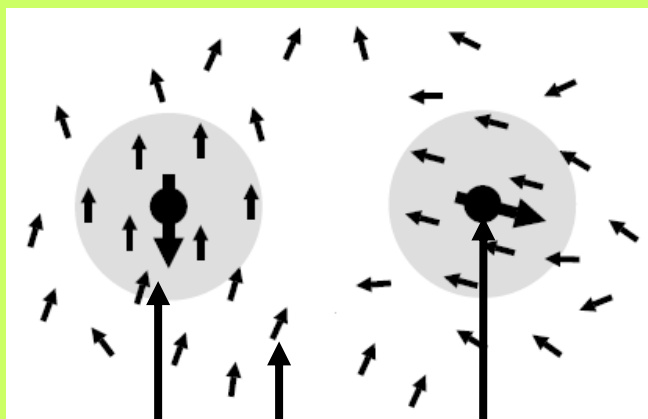
$D$  – коэффициент спин-волновой жесткости

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

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



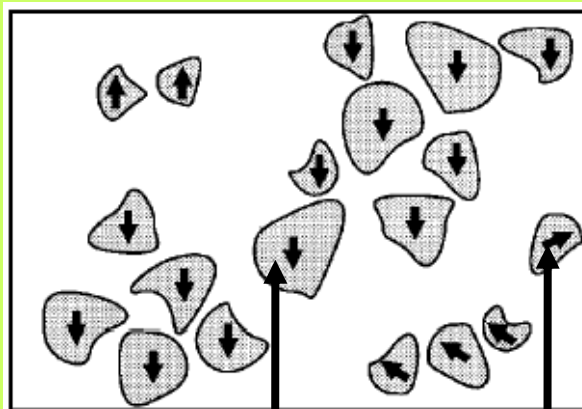
# Перколяционный ферромагнетизм



полярон

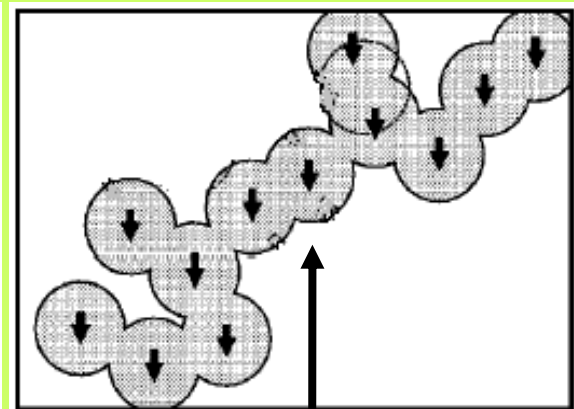
спин локализованных  
носителей заряда

спин примесных  
ионов



полярон

спин  
примесных  
ионов



кластер магнитных  
поляронов

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

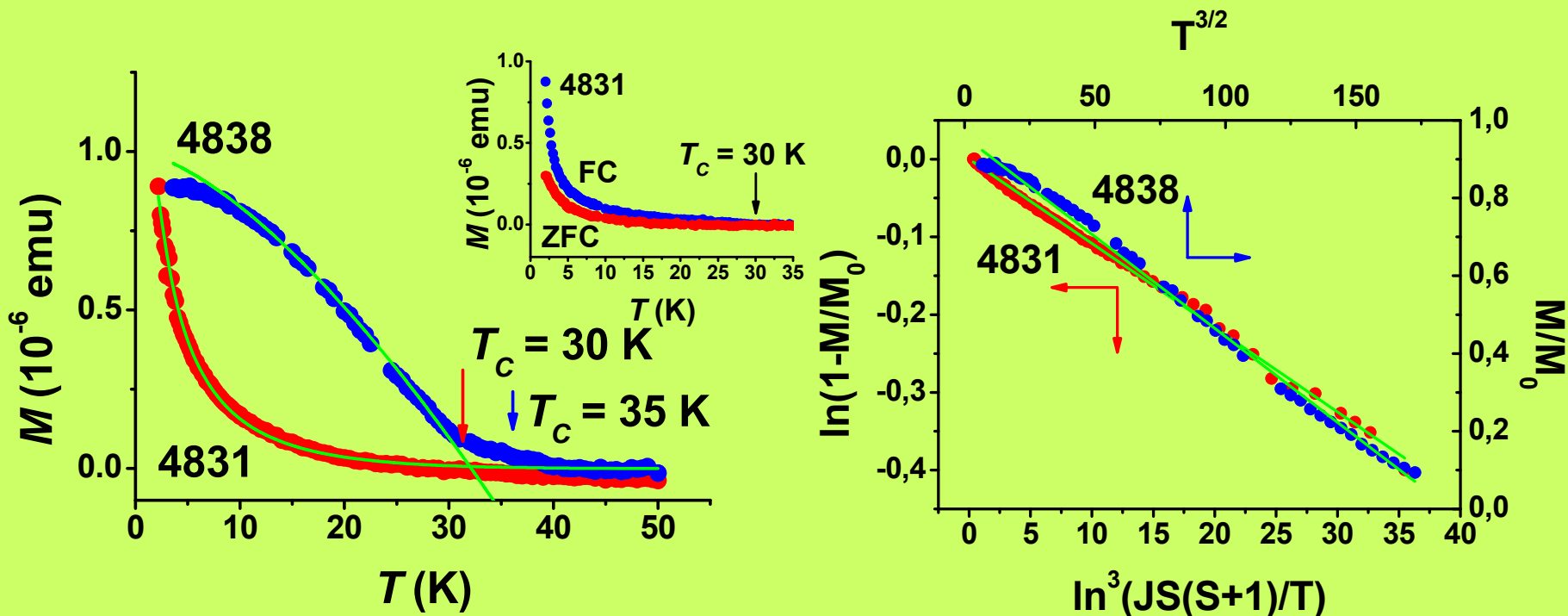
$s = 1/2$  - спин локализованной дырки,  $S = 5/2$  - спин примесного иона  $Mn^{2+}$ ,  $J$  - обменный интеграл,  $n_i$  - концентрация примесных ионов  $Mn^{2+}$ ,  $n_h$  - концентрация локализованных дырок,  $L$  - радиус локализации дырок [1-3].

[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/ $\delta$ -<Mn>



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

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

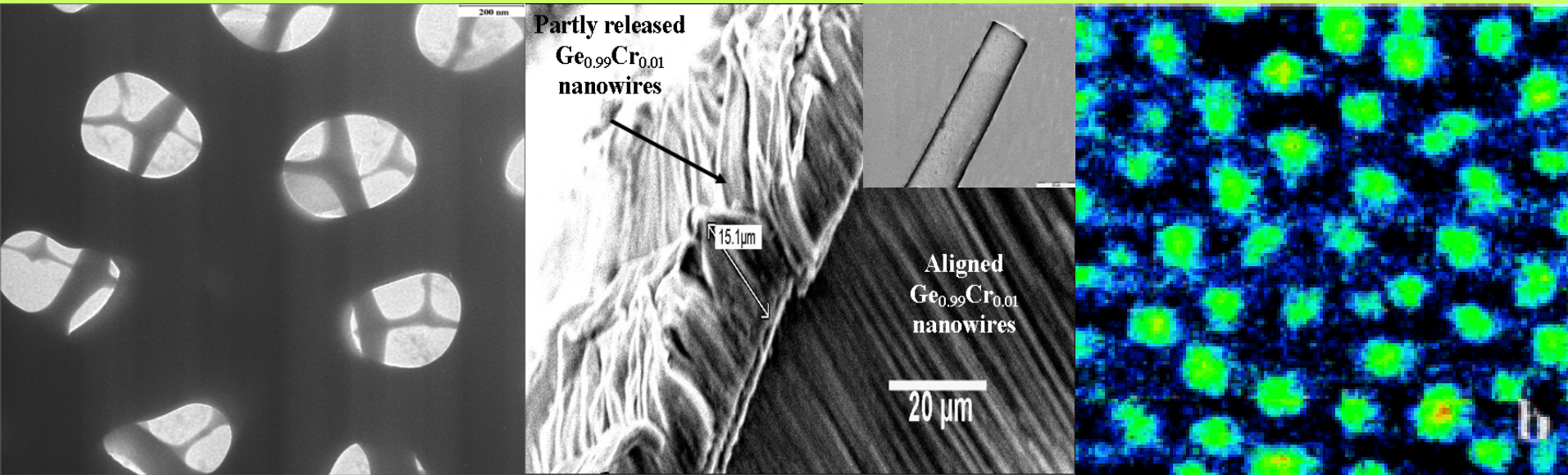
$$M(T) = M_0 (1 - BT^{3/2})$$

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

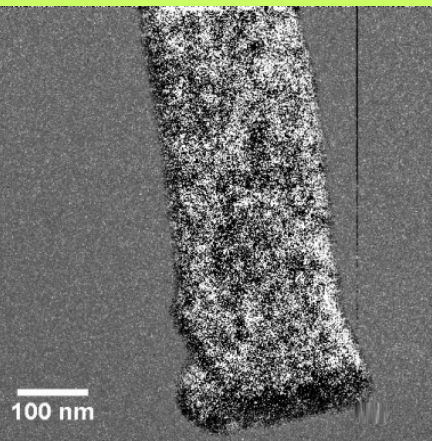
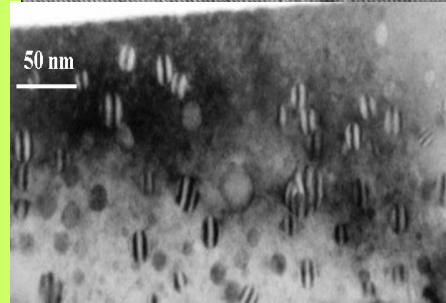
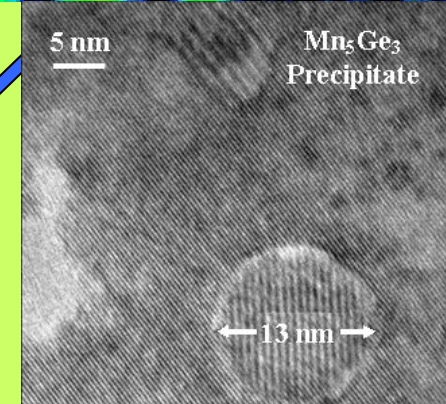
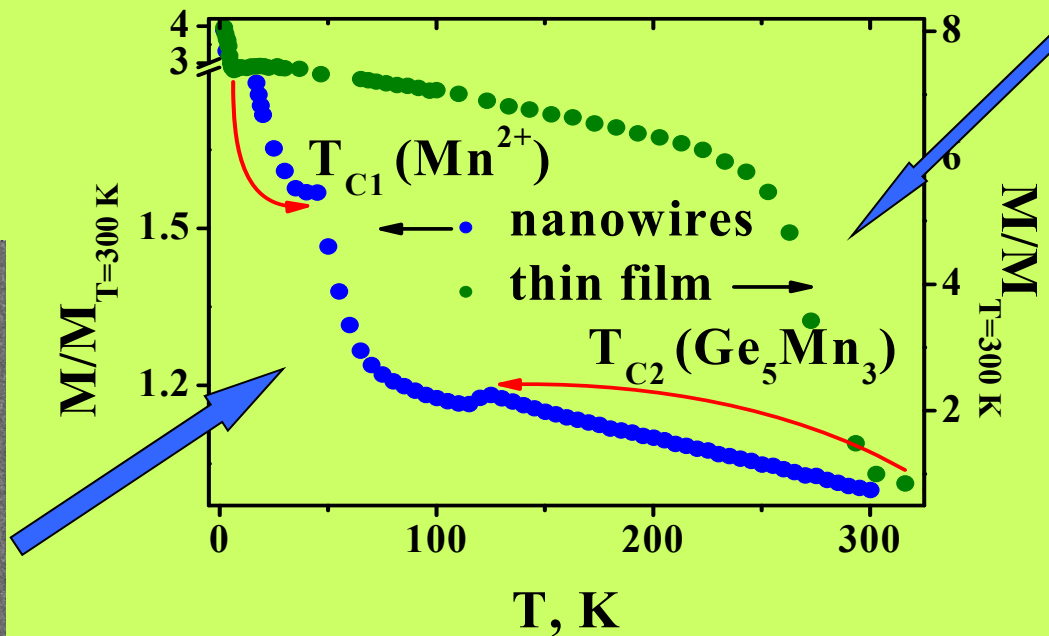
$$J = 72.3 \text{ мЭВ}$$

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

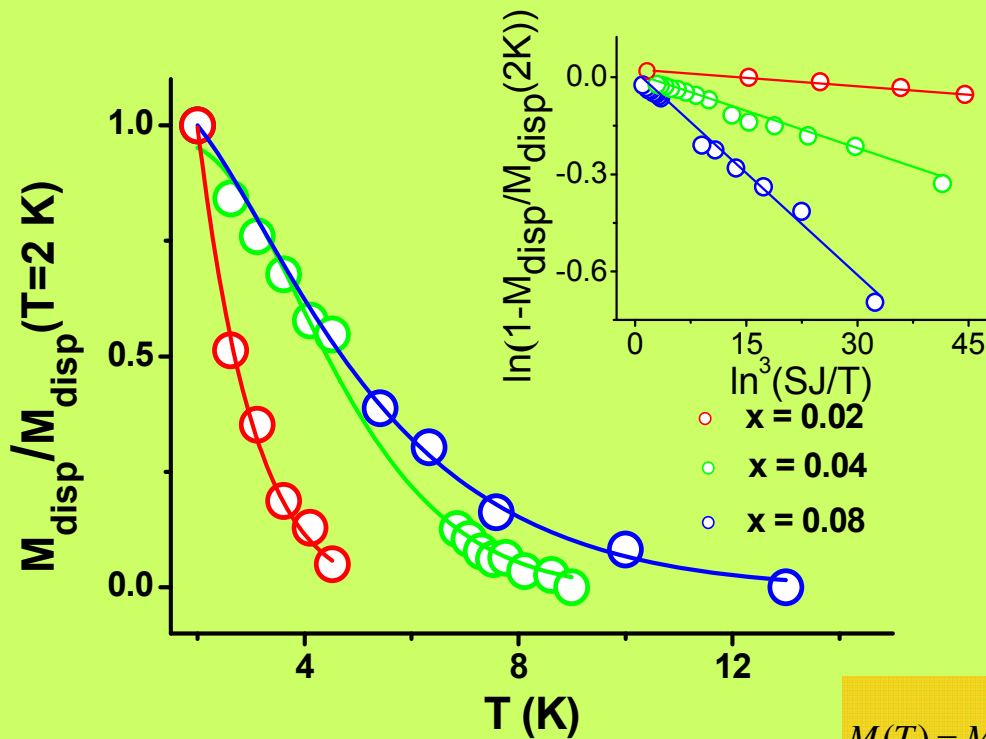
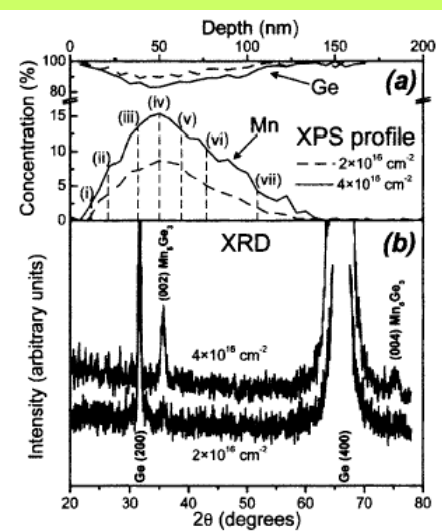
# Ферромагнетизм в нанопроволоках и нанопленках Ge:Mn



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

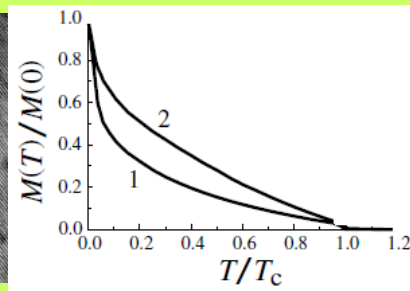
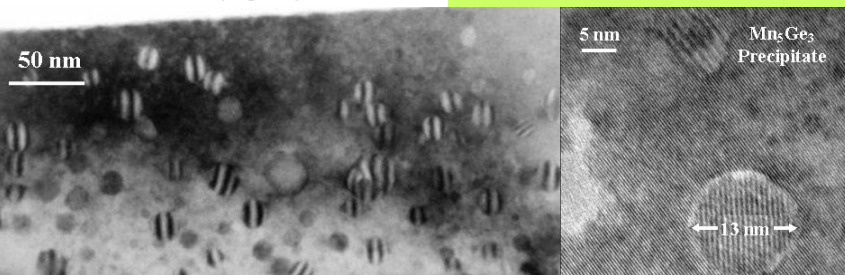


# Перколяционный механизм ферромагнетизма в нанопленках Ge:Mn



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

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



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  $\text{Mn}^{2+}$  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 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\delta\text{-}\langle\text{Mn}\rangle$

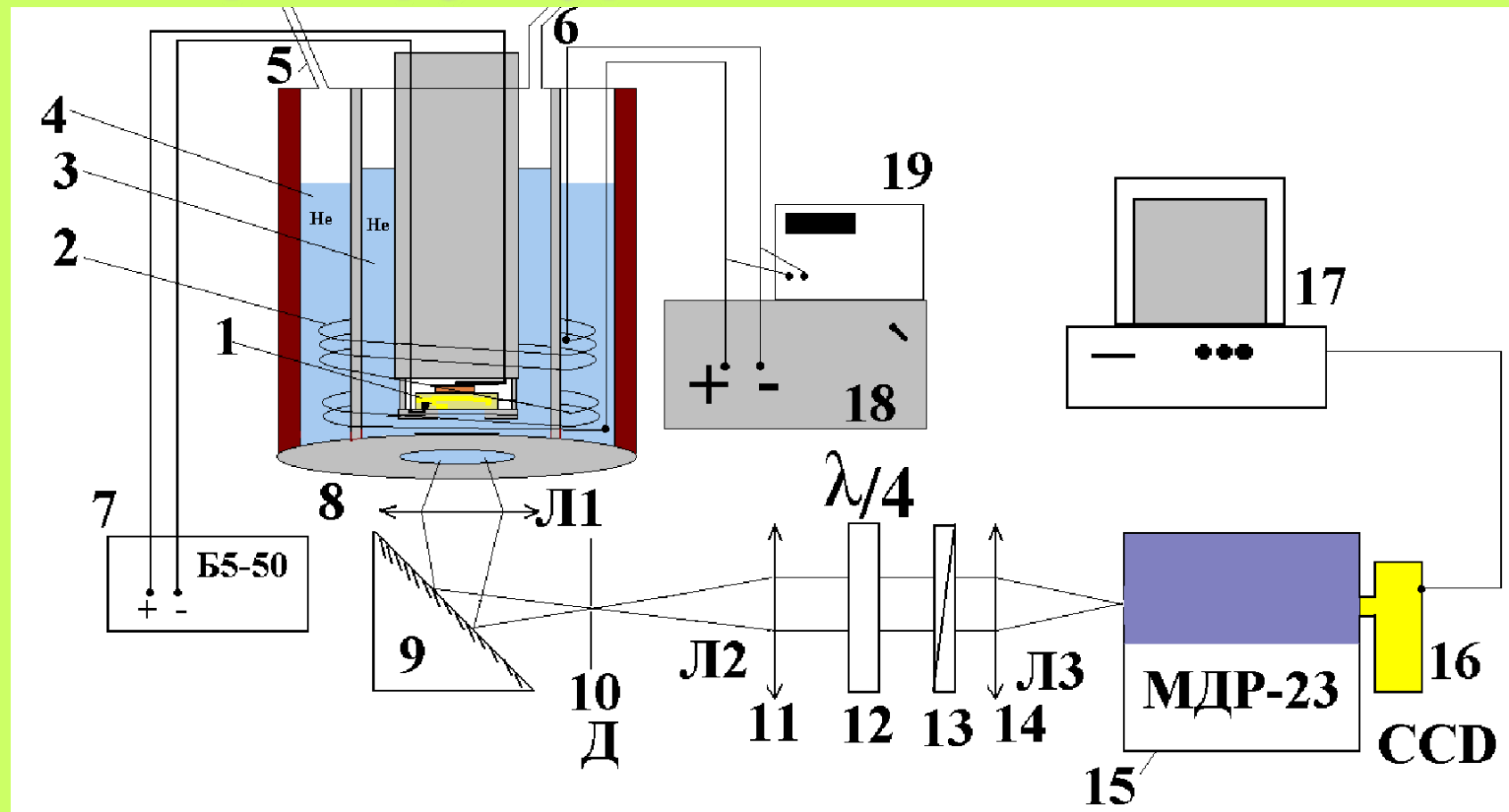
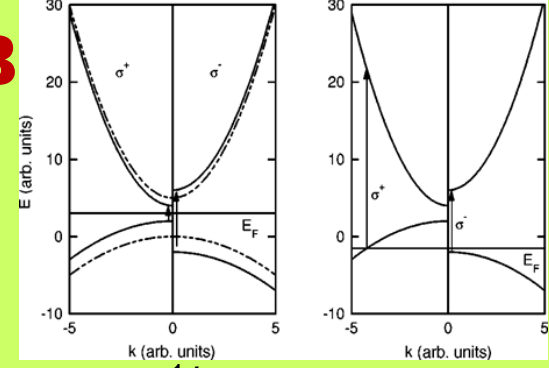
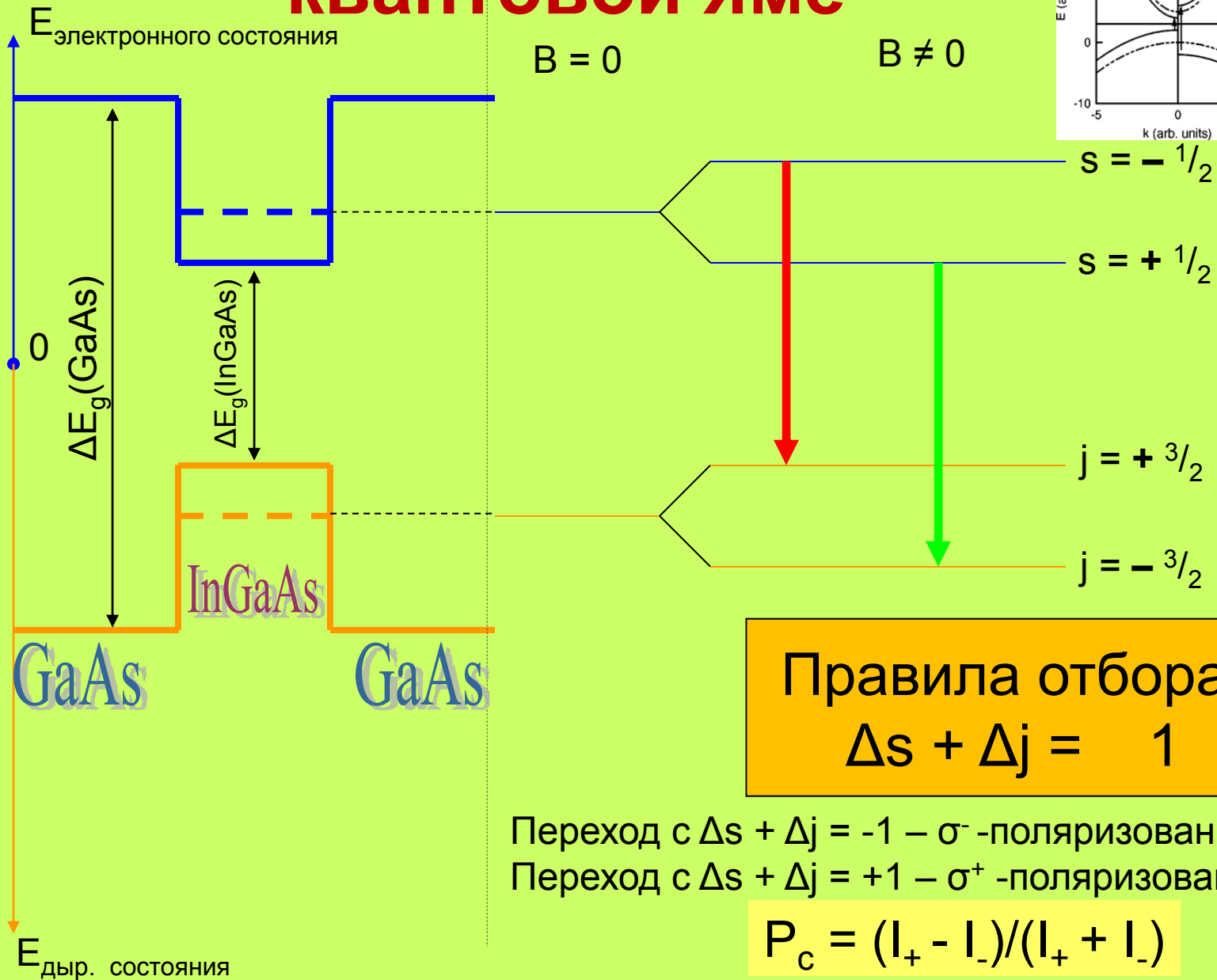


Схема установки : 1 - Исследуемая структура; 2 - Обмотки соленоида сверхпроводящего материала; 3 - Область криостата со сверхпроводящим магнитом, заполняемая жидким He; 4 - Рабочая область криостата, заполняемая жидким гелием; 5 - Выход He, испарившегося из области с соленоидом; 6 - Откачка He из рабочей 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

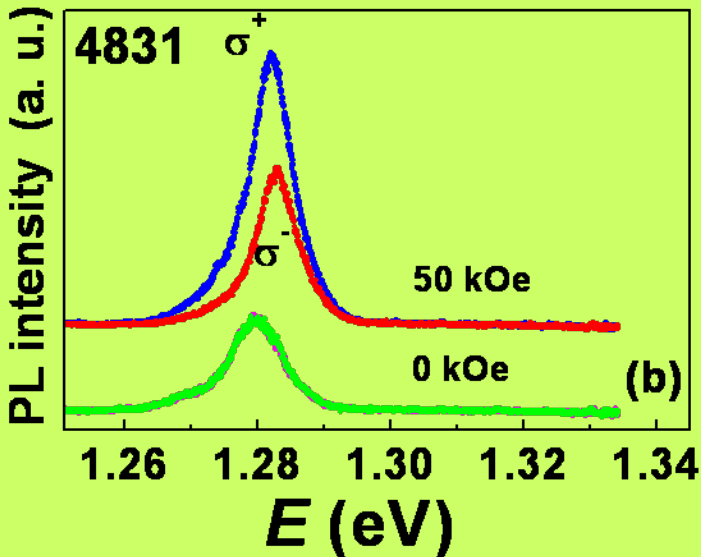
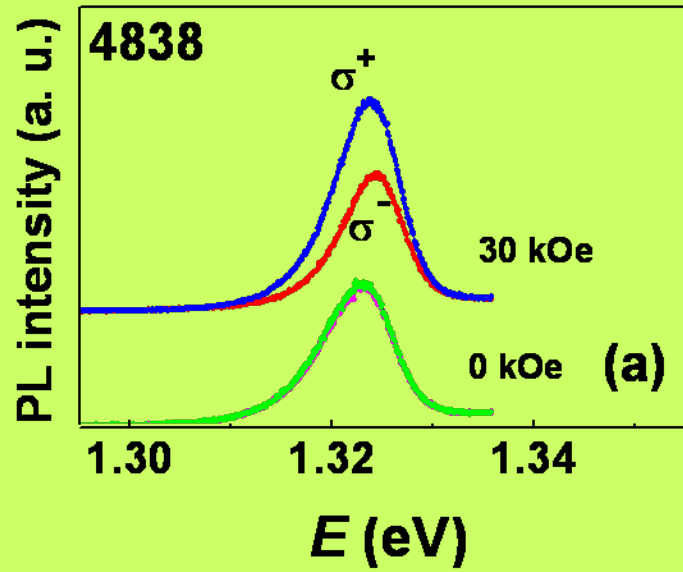


Правила отбора:  
 $\Delta s + \Delta j = 1$

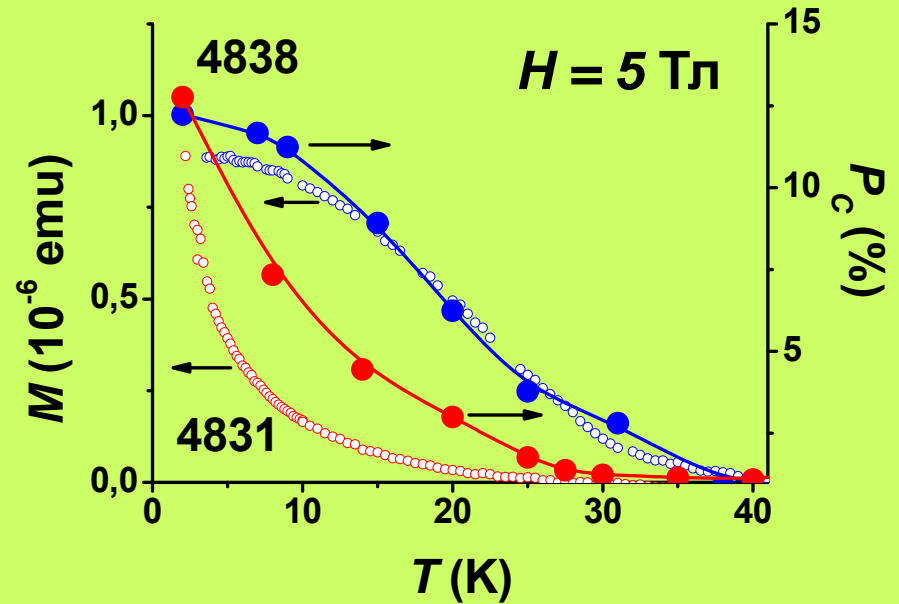
Переход с  $\Delta s + \Delta j = -1$  –  $\sigma^-$ -поляризованный свет  
 Переход с  $\Delta s + \Delta j = +1$  –  $\sigma^+$ -поляризованный свет

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

# Поляризованная фотолюминесценция гетероструктур InGaAs/GaAs/ $\delta$ -<Mn>

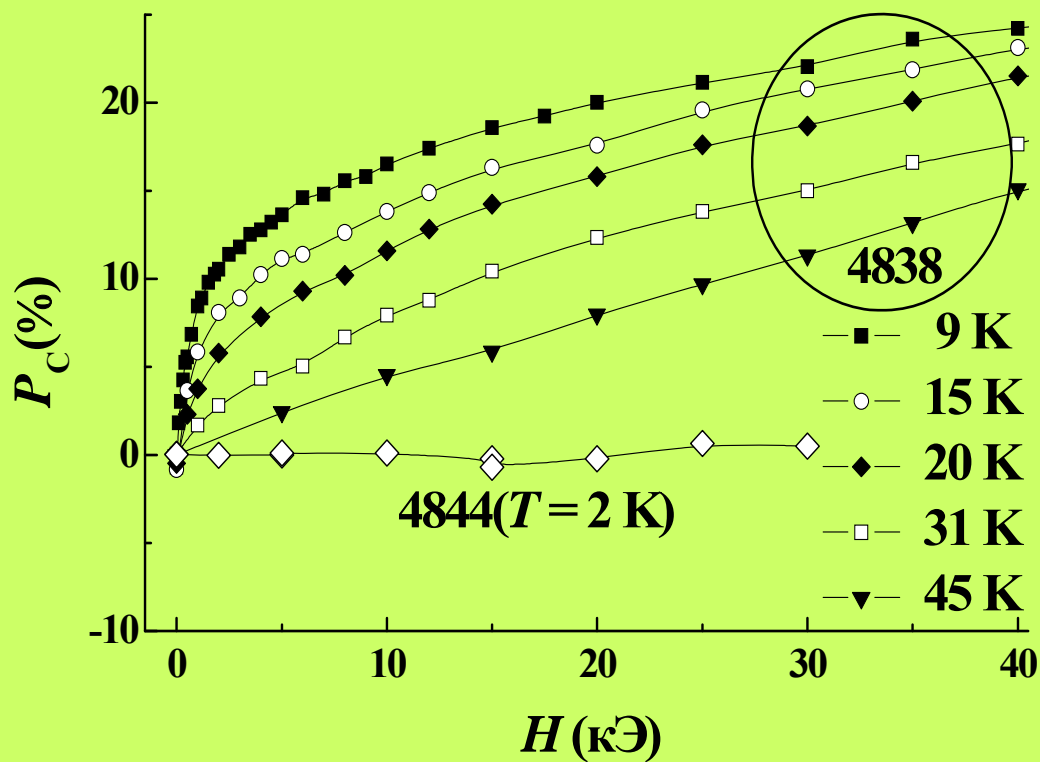


$$P_C = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$



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

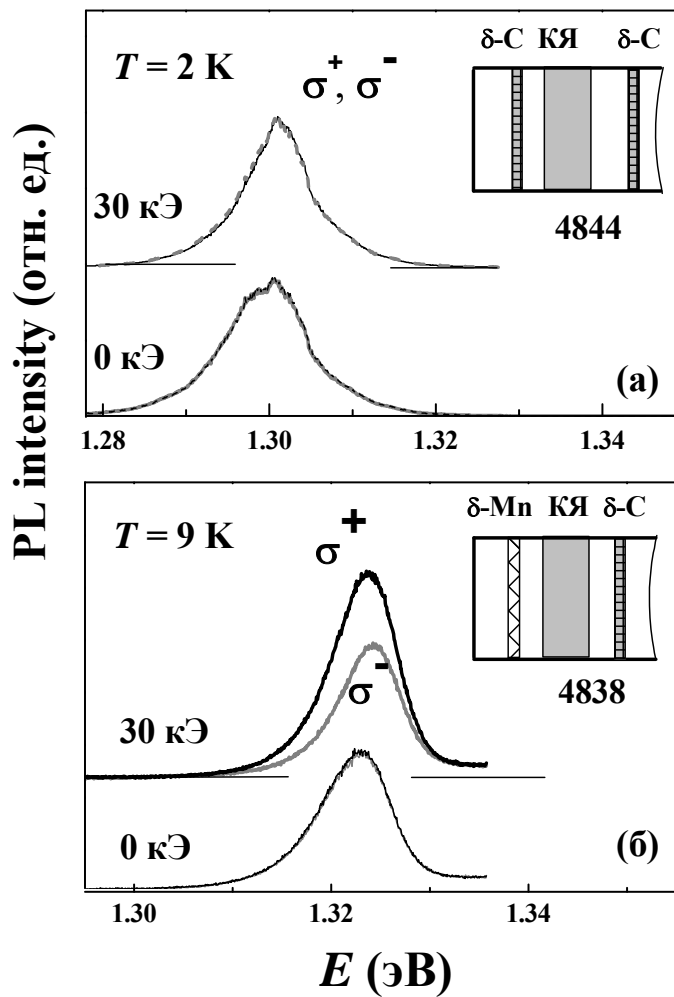
# Зависимость циркулярной поляризации в сингулярном образце от магнитного поля



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



# Имитация марганцевого слоя углеродным слоем



Спектры фотолюминесценции для образца 4844 (с  $\delta$ -<C>-слоем вместо  $\delta$ -<Mn>) при  $T = 2$  К (а) и образца 4838 (с  $\delta$ -<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),  $\delta$ -<C>-слой углерода и  $\delta$ -<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  $\approx 600$  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!

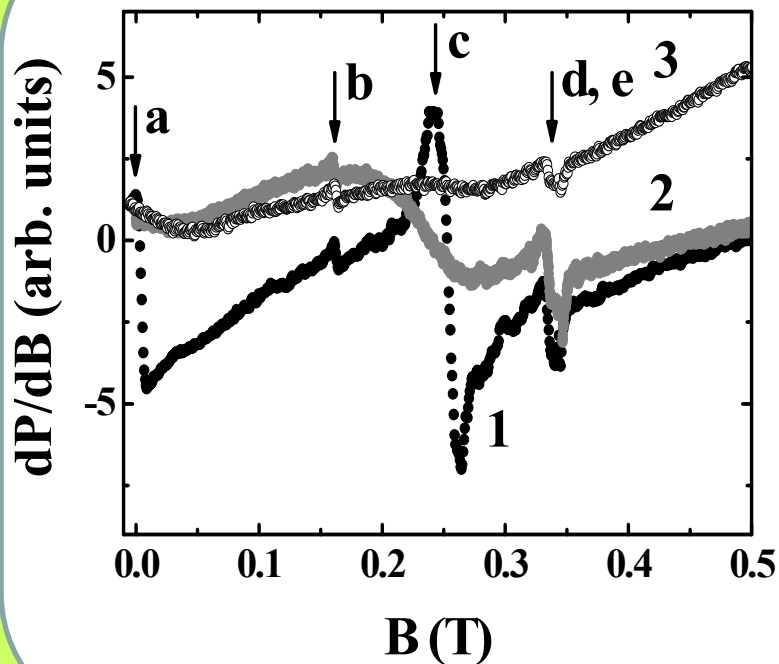
Работа частично поддержана программой Президиума РАН № 27 «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов».

Руководитель академик Алдошин С.М.

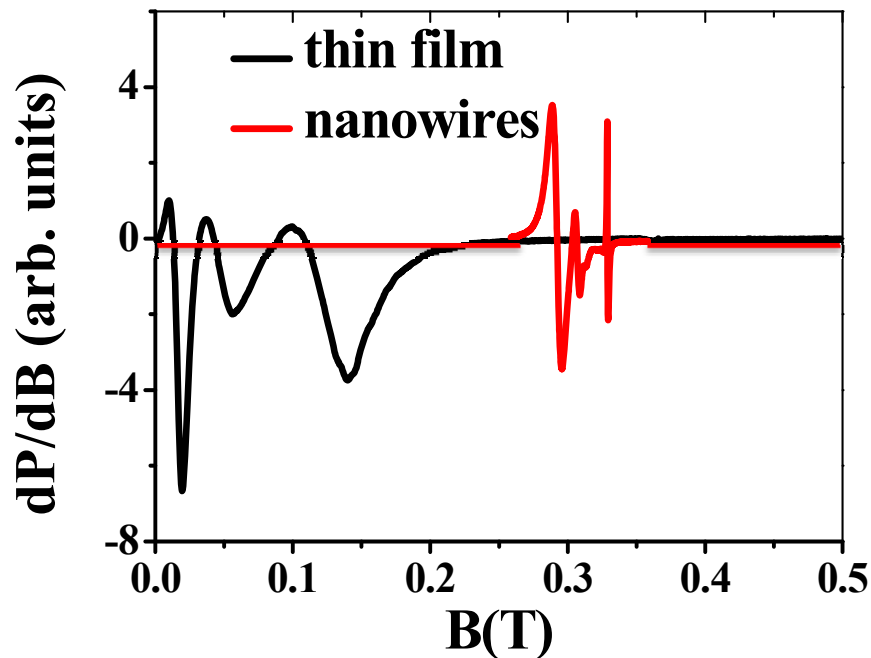
Авторы признательны сотрудникам Научно-исследовательского физико-технического института Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского М. В. Дорохину, Ю. А. Данилову, и Б. Н. Звонкову за образцы, предоставленные для исследований.

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

# Электронный спиновый резонанс



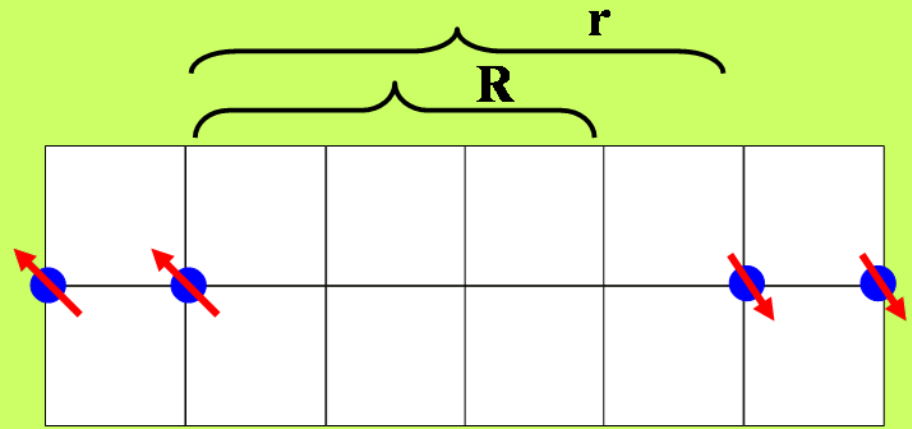
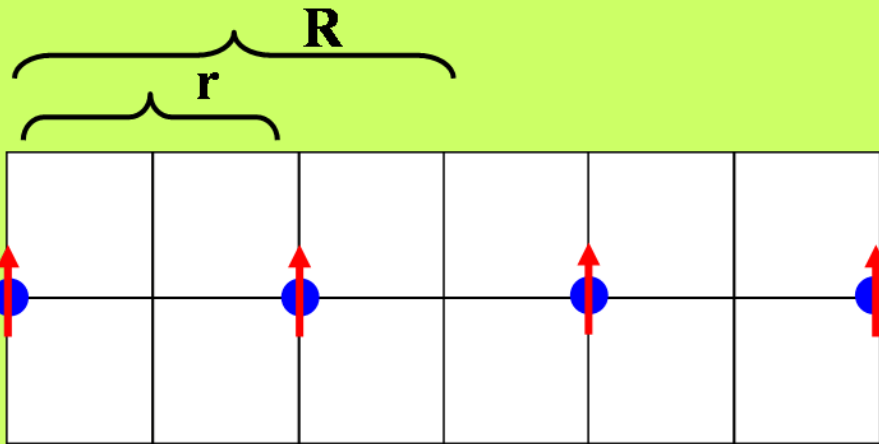
ЭСР в гетероструктурах  
InGaAs/GaAs/ $\delta$ -Mn при  $T = 4$  К.



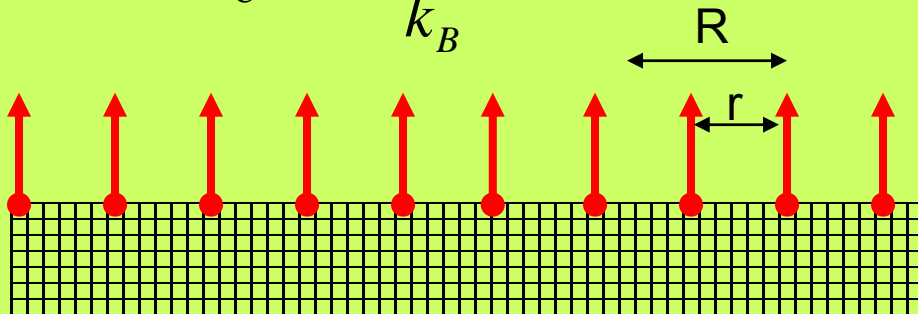
Ферромагнитный резонанс в  
нанопроволоках и нанопленках Ge:Mn

# Особенности обменного взаимодействия в гетероструктурах InGaAs/GaAs/ $\delta$ -<Mn> на сингулярных и вицинальных гранях GaAs

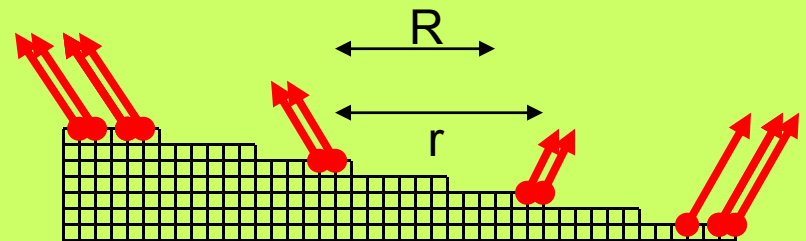
$$R/r_S = L \cdot n_h^{1/3} \longrightarrow n_h \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \longrightarrow L = a_B = 7.8 \text{ \AA}$$



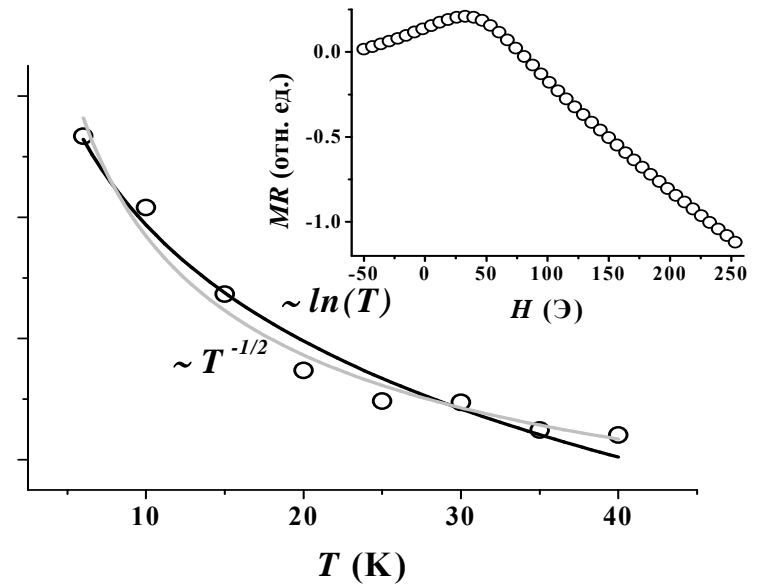
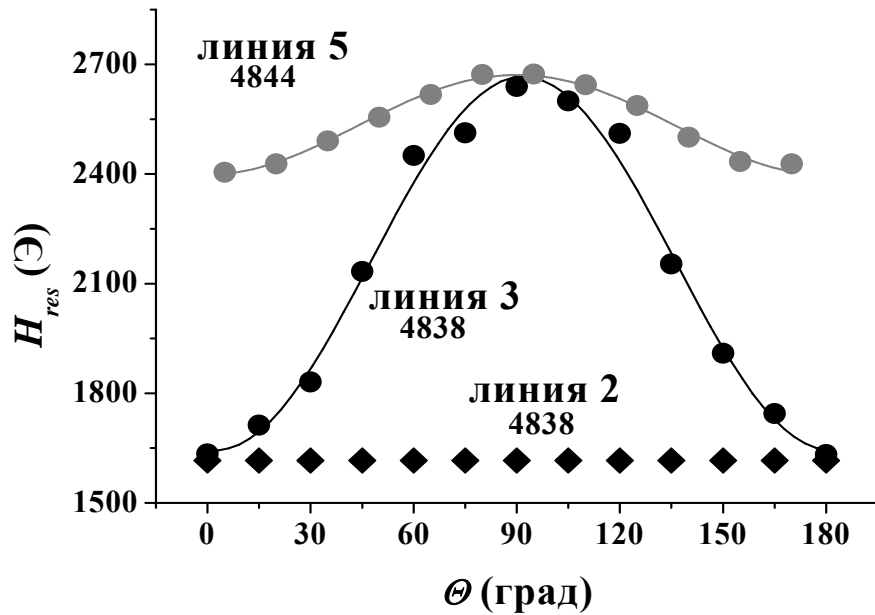
$$T_C = \frac{S(S+1)}{k_B} J$$



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



# Аксиальная анизотропия линии ФМР и микроволновое магнитосопротивление

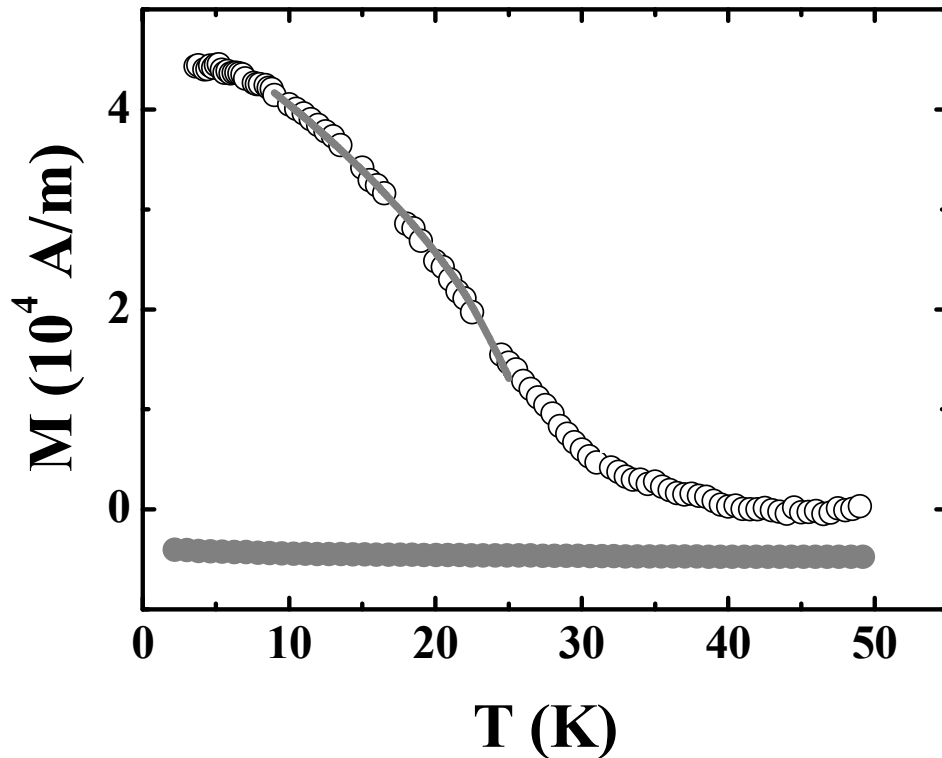


Ориентационные зависимости резонансного поля  $H_{res}$  линии 3 при температуре  $T = 4$  К и изотропной линии 2 при  $T = 4$  К спектра электронного спинового ренонса в образце 4838 (с  $\delta$ -<Mn>-слоем) при температуре  $T = 20$ .

Зависимость интенсивности линии 1 в нулевом магнитном поле от температуры  $T$  образца 4838 (с  $\delta$ -<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 К 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  $H = 1 \text{ kOe}$ .

Сплошная линия - аппроксимация.

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

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

# Магнитные характеристики гетероструктур InGaAs/GaAs/ $\delta$ -<Mn>

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

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



# 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

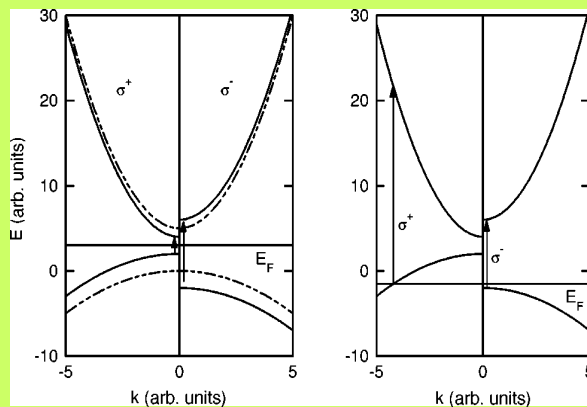
*Institute of Experimental Physics, Warsaw University, Hoza 69, 00681 Warsaw, Poland*

F. Matsukura and H. Ohno

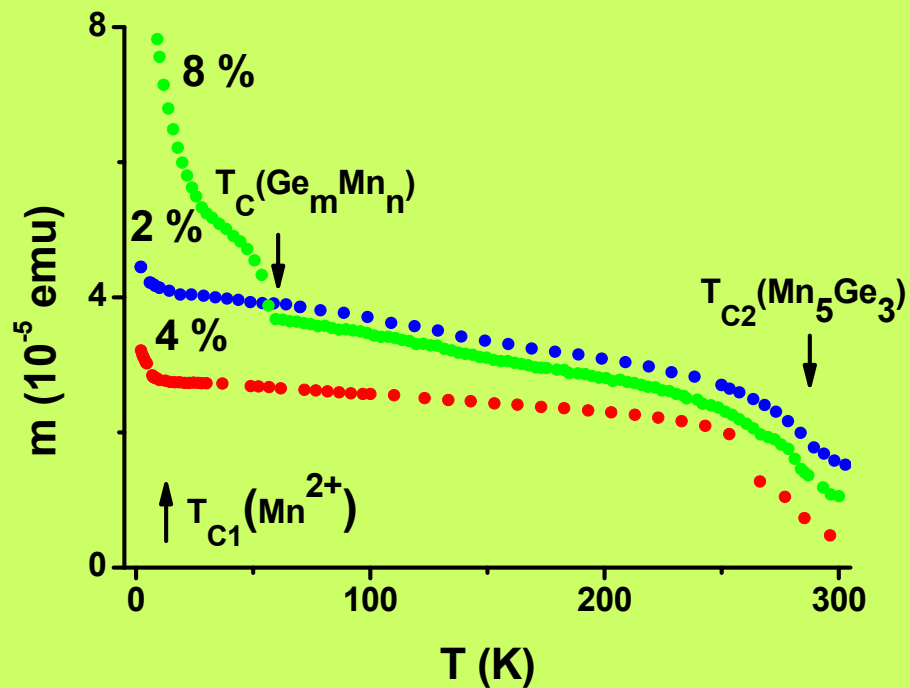
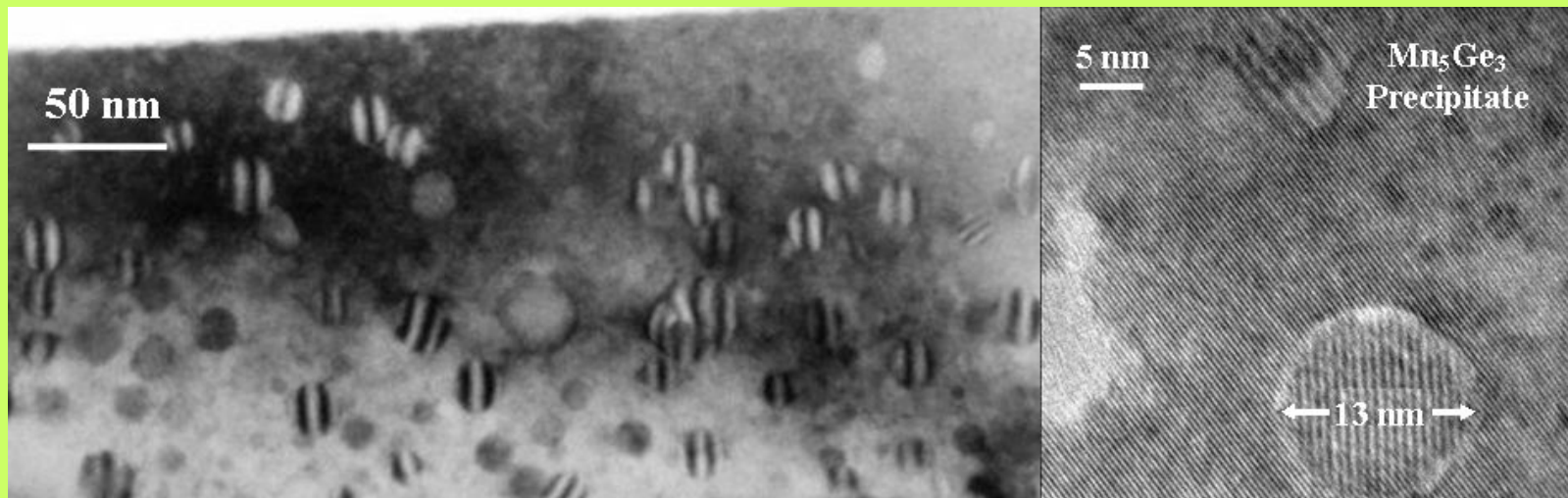
*Laboratory for Electronic Intelligent Systems, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan*

### 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.

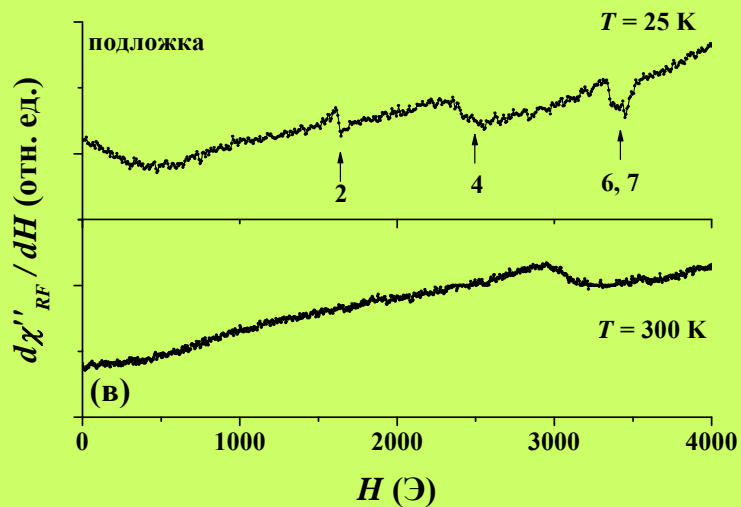
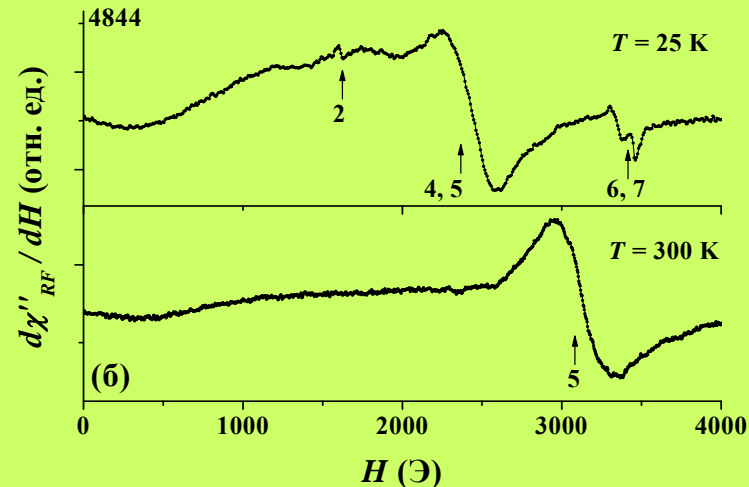
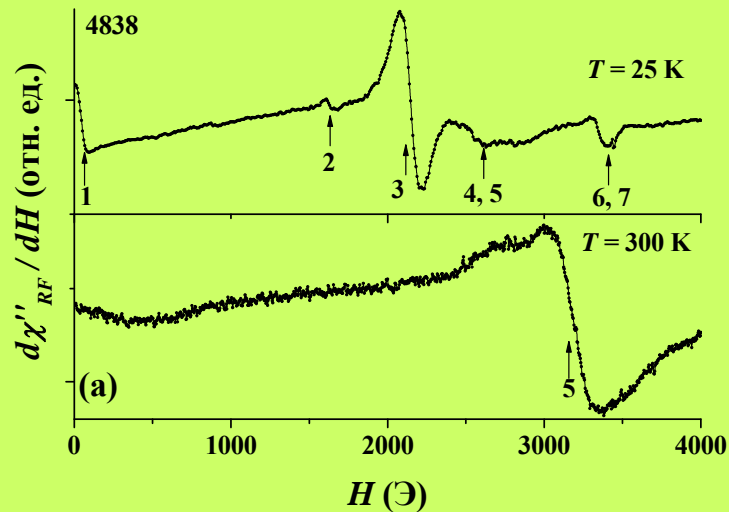


# Ферромагнетизм в нанопленках Ge:Mn



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

# Поляронные перколяции в магнитных полупроводниках

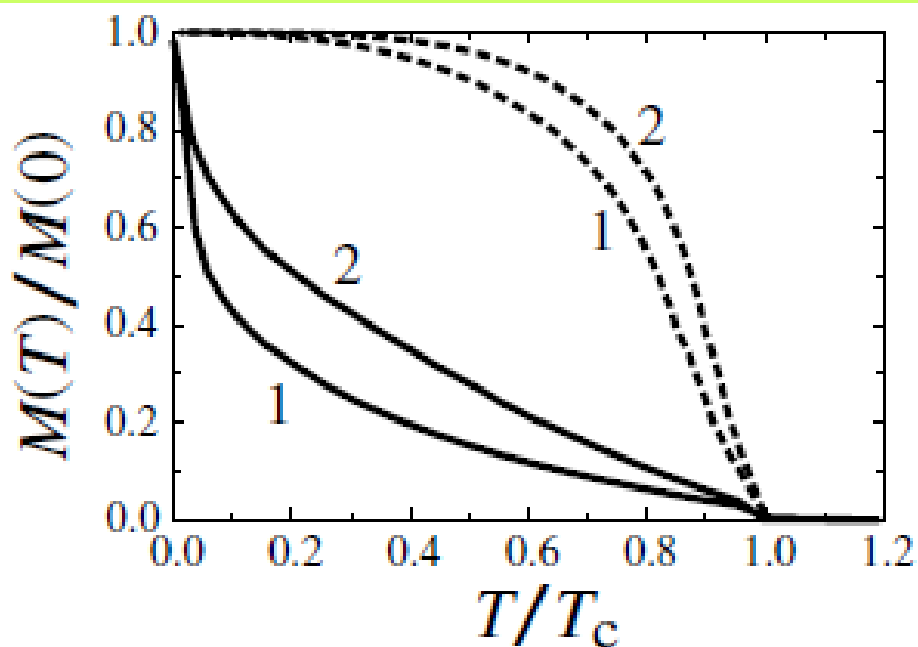
VOLUME 88, NUMBER 24

PHYSICAL REVIEW LETTERS

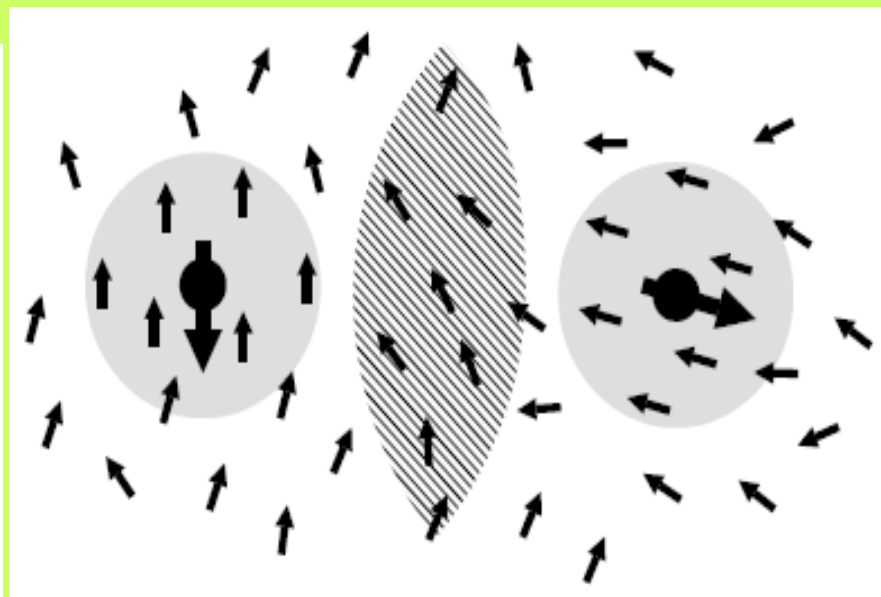
17 JUNE 2002

## 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

