

*L.D.Landau days in Chernogolovka 23-25 June
2014*

A.V.Gorbunov and V.B.Timofeev

**Suppression of spin splitting
in the Bose gas of dipolar excitons**

Dedicated to the memory of Yury A. Bychkov



**Институт Физики Твёрдого Тела РАН
Institute of Solid State Physics RAS**

Suppression of superfluidity of exciton-polaritons by magnetic field

Yuri G. Rubo^{a,*}, A.V. Kavokin^b, I.A. Shelykh^b

Physics Letters A 358 (2006) 227–230

Плотность свободной энергии системы:

$$F = -\frac{1}{2m^*}(\vec{\psi} \cdot \Delta \vec{\psi}^*) - \mu(\vec{\psi} \cdot \vec{\psi}^*) - i\Omega[\vec{\psi} \times \vec{\psi}^*] + \frac{1}{2}[U_0(\vec{\psi} \cdot \vec{\psi}^*)^2 - U_1|\vec{\psi} \cdot \vec{\psi}^*|^2]$$

$$U_0 = \alpha_1$$

Кинетическая энергия

Химический потенциал

$\Omega = g\mu_B B/2$
(зеemanовское расщепление)

Поляризационно-независимое взаимодействие в конденсате

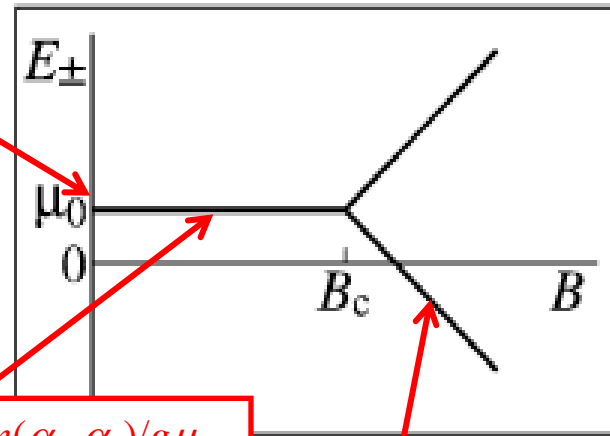
Линейно-циркулярный дихроизм конденсата

$$U_1 = (\alpha_1 - \alpha_2)/2$$

$U_0 > U_1 > 0$ - коэффициенты взаимодействия

α_1 и α_2 - матричные коэффициенты поляритон-поляритонного рассеяния для параллельных и антипараллельных спинов

Без магнитного поля: $B = 0$
линейная поляризация,
перпендикулярная компонента псевдоспина $S_z = (n_+ - n_-)/2 = 0$,
 $\mu_0 = (U_0 - U_1)n = (\alpha_1 + \alpha_2)/2n$

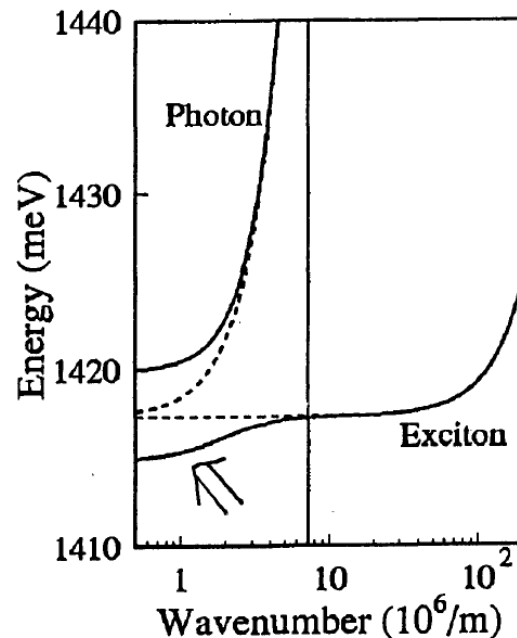
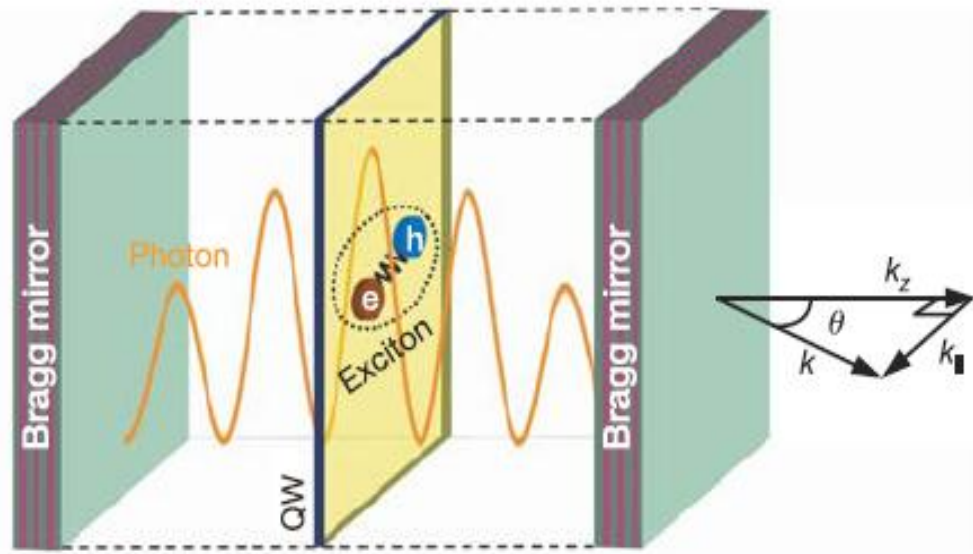


Слабое магнитное поле: $B \leq B_c = n(\alpha_1 - \alpha_2)/g\mu_B = 2\Omega_c/g\mu_B$
эллиптическая поляризация: $S_z = \Omega/2U_1$
степень поляризации: $\rho = 2S_z/n = g\mu_B B/2nU_1$

Сильное магнитное поле: $B > B_c = 2\Omega_c/g\mu_B$
циркулярная поляризация: $S_z = n/2, \rho = 1$
 $\mu = U_0 n - \Omega$

Зеemanовское расщепление компонент по энергии полностью подавляется, пока состояние с антипараллельными спинами энергетически выгоднее, чем с однонаправленными: **поляритон-поляритонное взаимодействие в точности компенсирует зеemanовское расщепление**

Концепция экситонных *поляритонов* в микрорезонанторе



$$|\psi_{\pm}\rangle = \eta_c |\psi_c\rangle \pm \eta_x |\psi_x\rangle$$



S.I.Pekar, 1957

JJ Hopfield, 1958

GaAs QW

$J_{hh}(3/2)$

$J_e(1/2)$



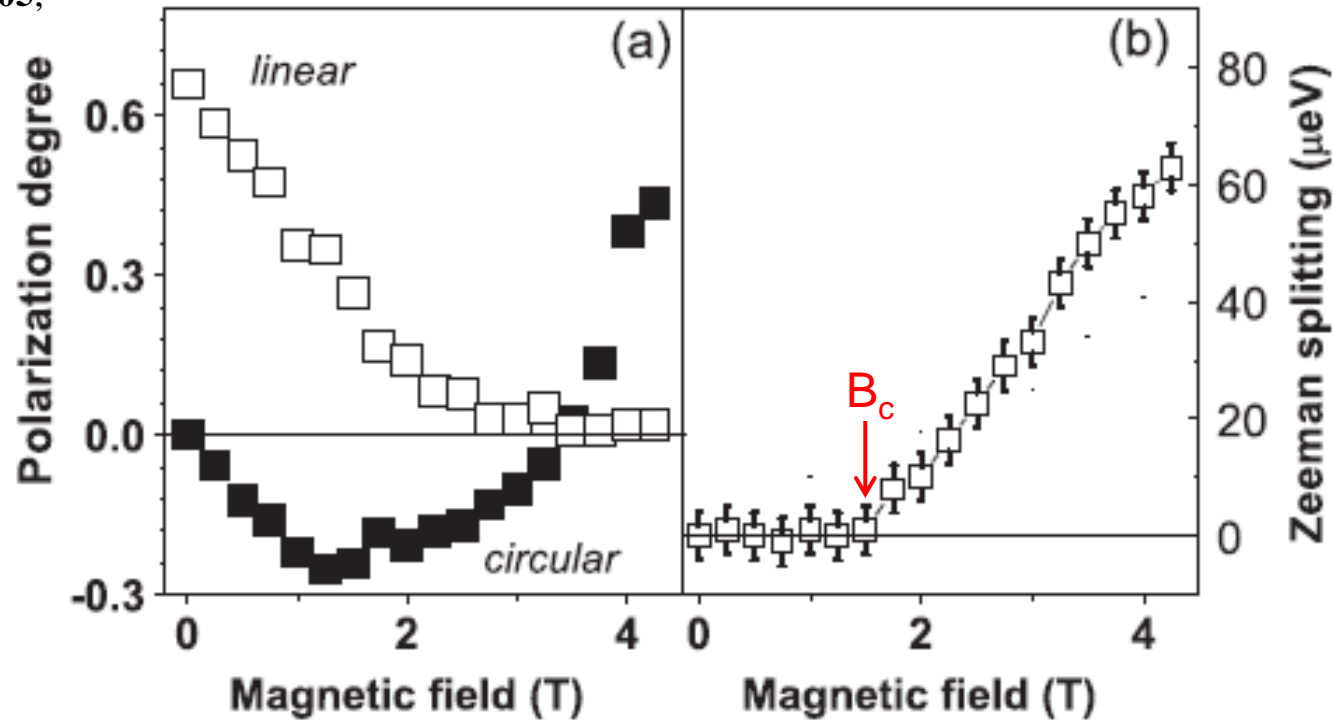
$S_{ex} = \pm 1$ (opt. active); ± 2 (dark)

Compensation of Zeeman splitting in magnetic field – experiment with polaritons

Polarized Nonequilibrium Bose-Einstein Condensates of Spinor Exciton Polaritons in a Magnetic Field

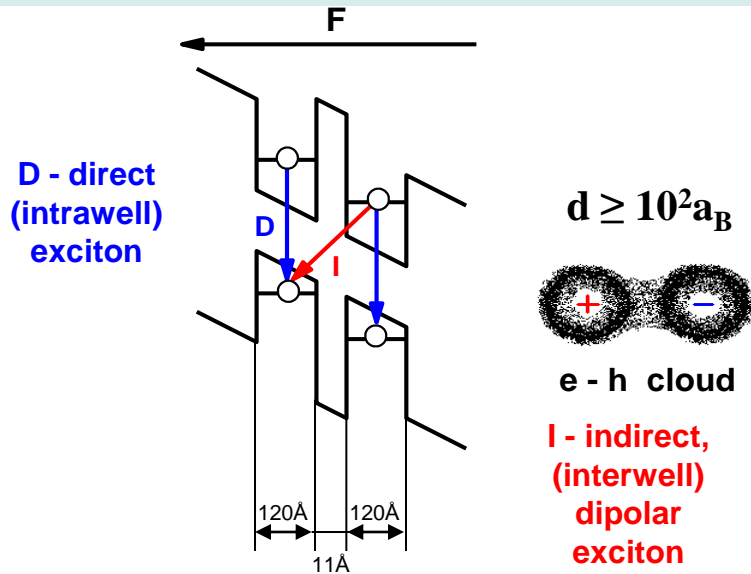
A. V. Larionov,¹ V.D. Kulakovskii,¹ S. Höfling,² C. Schneider,² L. Worschech,² and A. Forchel²

Phys. Rev. Lett. **105**,
256401 (2010)

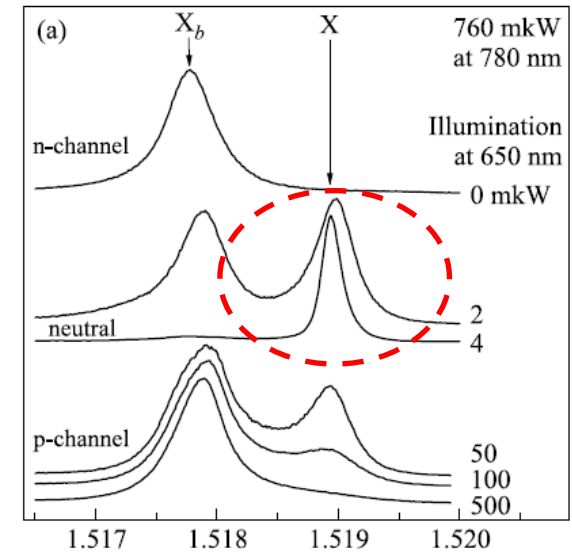
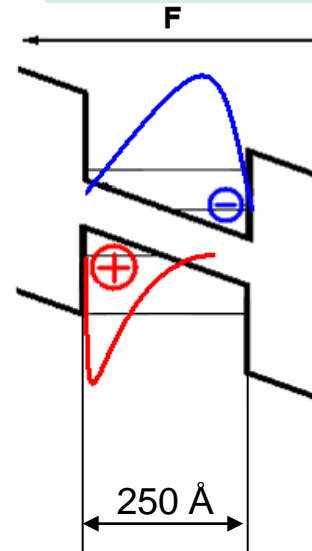


- $B \leq B_c \approx 1.7 \text{ T}$ – no spin splitting between circularly polarized components & elliptical polarization
- $B > B_c \approx 1.7 \text{ T}$ – Zeeman splitting grows linearly with B with g -factor usual for these quantum wells
- Negative circular polarization in elliptically polarized condensate \rightarrow
no thermodynamic equilibrium

Double quantum well (DQW)



Wide single quantum well (SQW)



Lozovik and Yudson (1975), Shevchenko (1976), Fukuzawa et al. (1990), Kash et al. (1992), Butov et al. (1994-), Snoke et al. (2002-), Rapaport et al. (2003-)

V.V.Solov'ev, I.V.Kukushkin, Yu.Smet et al. JETP Letters **83**, 553 (2006); A.V.Gorbunov, V.B.Timofeev JETP Letters **84**, 329 (2006)

Spatial separation of electrons and holes → spatially indirect dipolar excitons

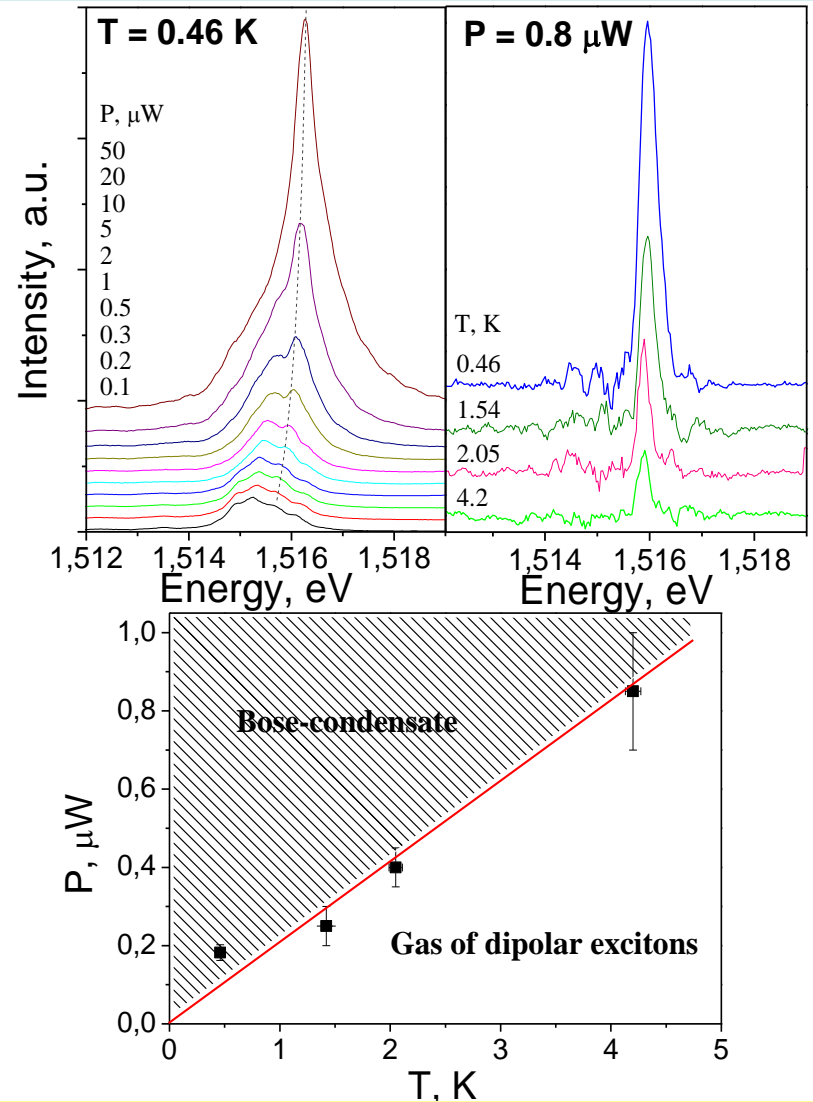
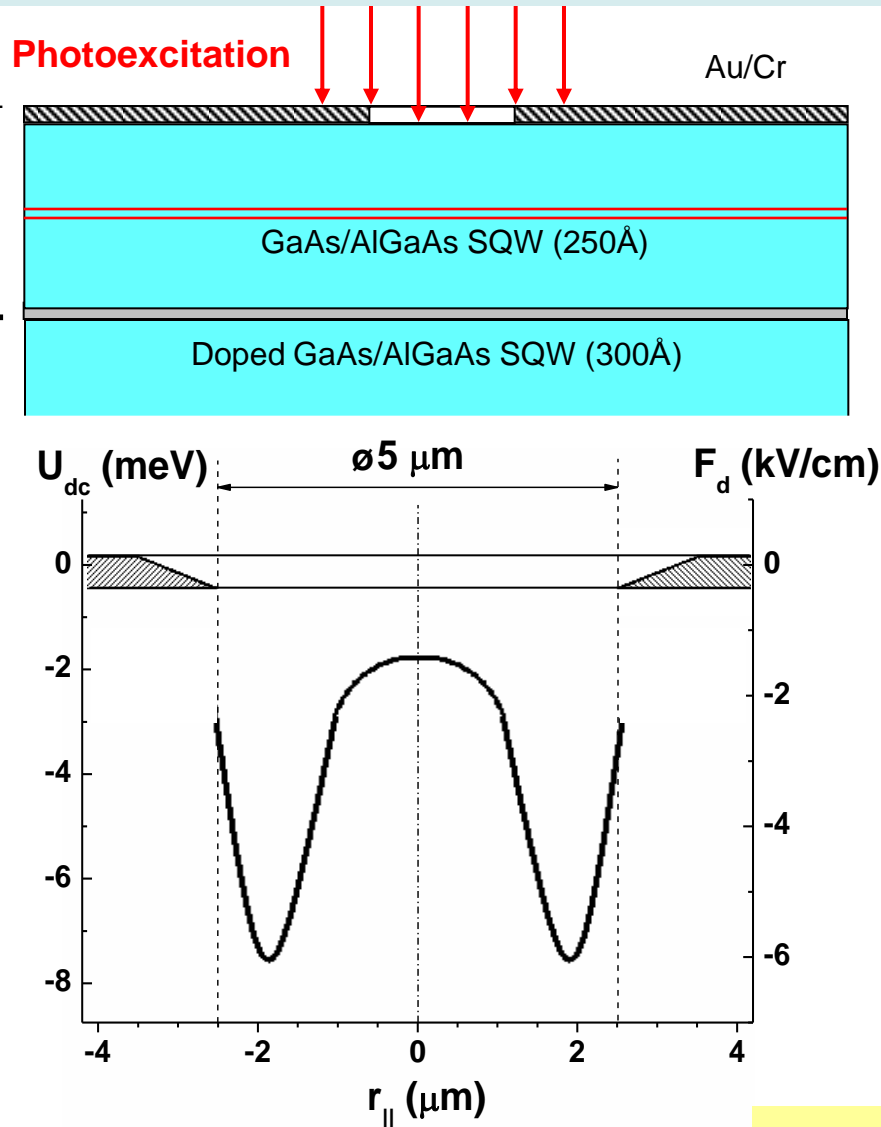
SQW GaAs/AlGaAs 250Å: no thin interwell barrier layer → higher structural perfection: FWHM linewidth of direct exciton ≤ 0.2 meV instead of 1 meV!

Large dipole moment in the ground state → dipole-dipole repulsion → no multiexciton complexes

Reduced overlap of electron and hole wave functions → increased radiative decay time (10^{-9} - 10^{-5} s) → good opportunity to cool the excitons

Neutrality in SQW is crucial → charge balance can be controlled combining over-barrier and sub-barrier excitation

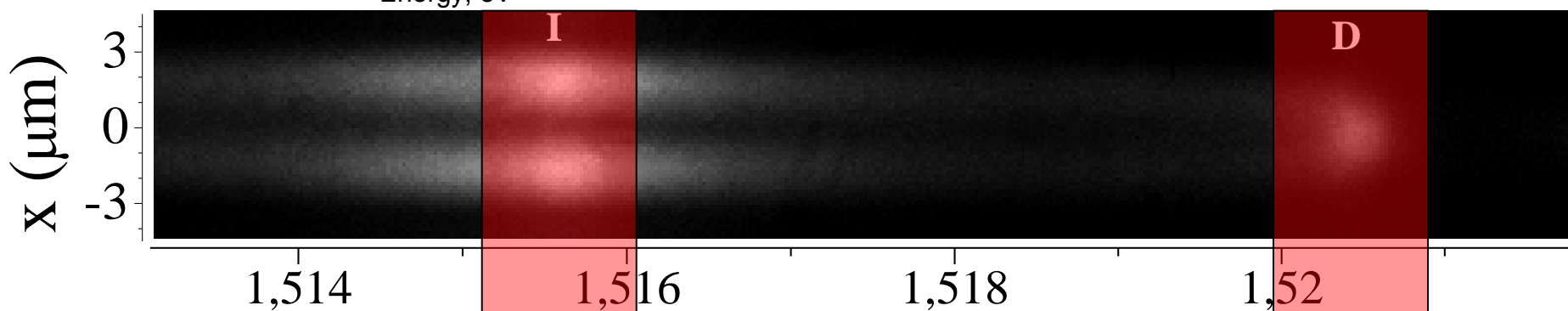
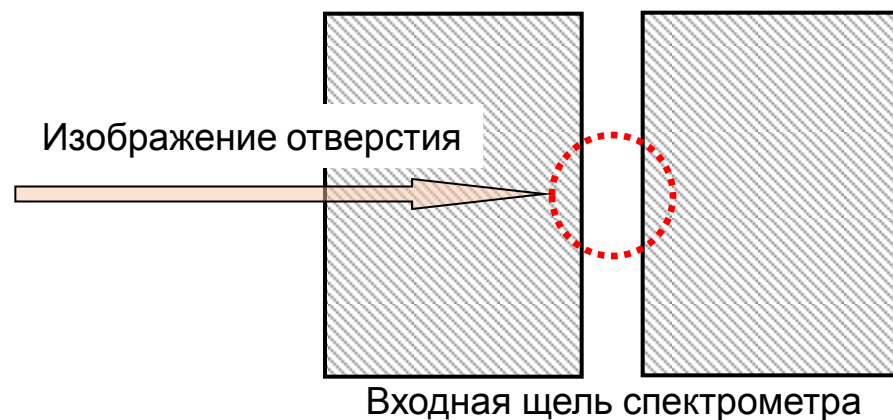
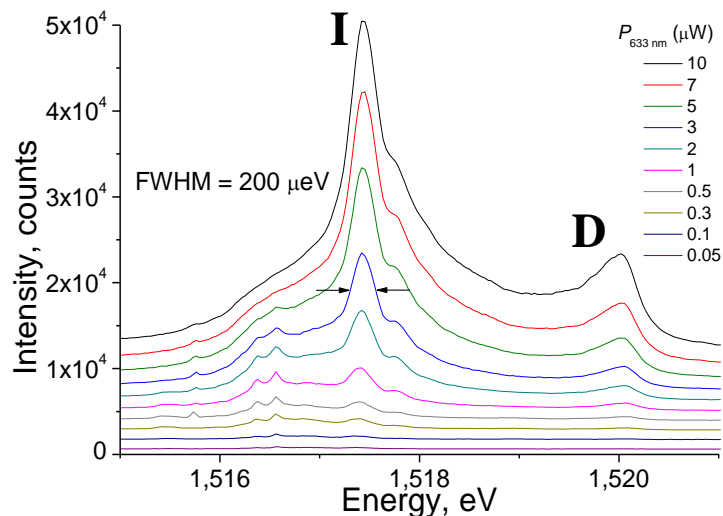
Ring lateral trap for indirect excitons – phase diagram



Barrier height $\Delta V \approx 5 \text{ meV} \gg k_B T$

Narrow line ($\leq 0.3 \text{ meV}$ FWHM) arises in a threshold way with pumping P and drops quickly with temperature $T \rightarrow$ phase diagram of BEC can be built in coordinates " $P - T$ "

Кольцевая ловушка – пространственное распределение люминесценции



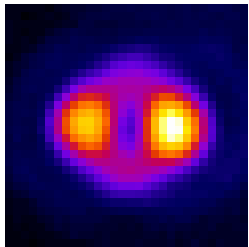
Real space

K-space (far field)

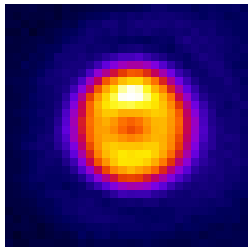
Energy (eV)

A V. Gorbunov, V.B. Timofeev, JETP Letters **84** 329 (2006),
 V. B. Timofeev, A.V. Gorbunov, Phys. Stat. sol. (c) **5** 2379 (2008)

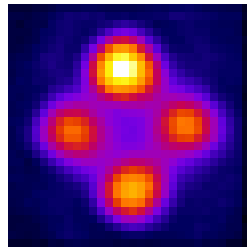
Pseudo images of patterned luminescence structure of dipolar exciton BEC in single and coupled lateral traps of different shapes



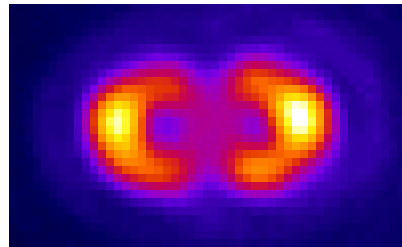
5 μm
(ellipse)



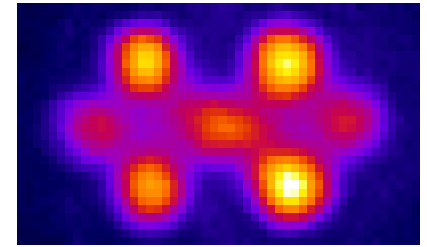
4 μm
(ring)



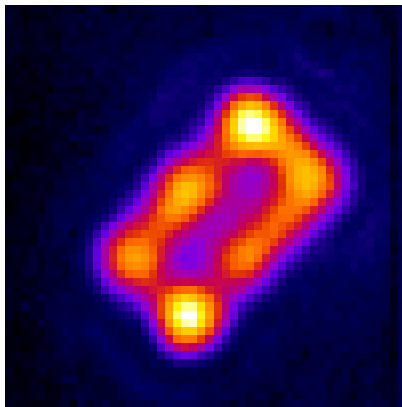
5 μm
(square)



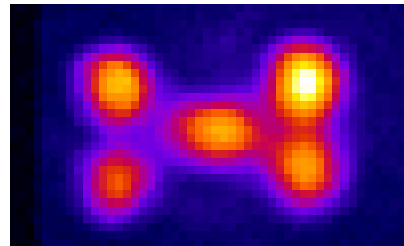
5 μm
(coupled rings)



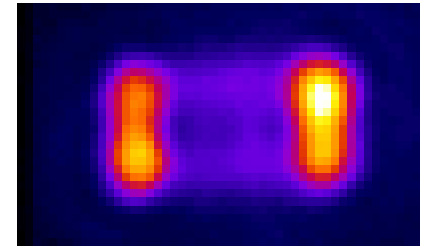
5 μm
(coupled squares)



5x10 μm
(rectangular)



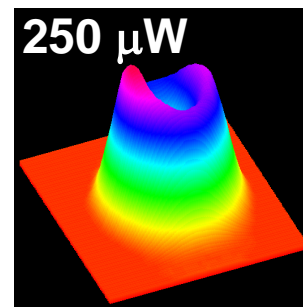
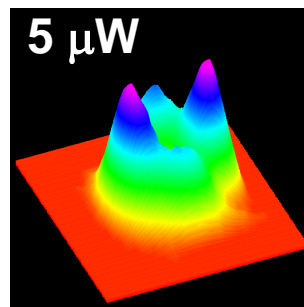
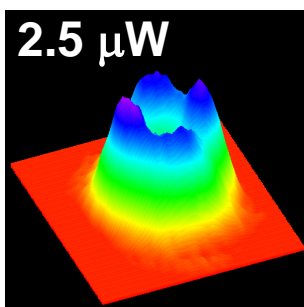
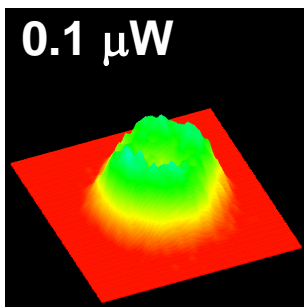
7 μm
(coupled triangular)



5x10 μm
(rectangular)

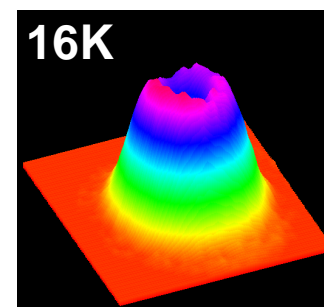
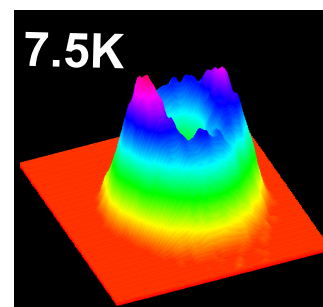
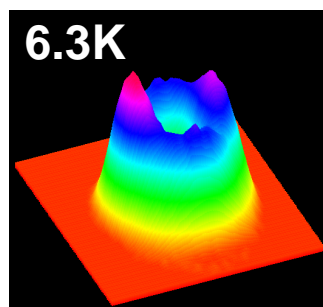
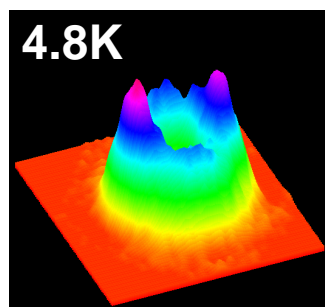
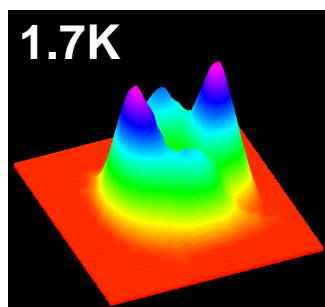
Контраст пятен в картине люминесценции

$T = 1.7 \text{ K}$



Power \longrightarrow

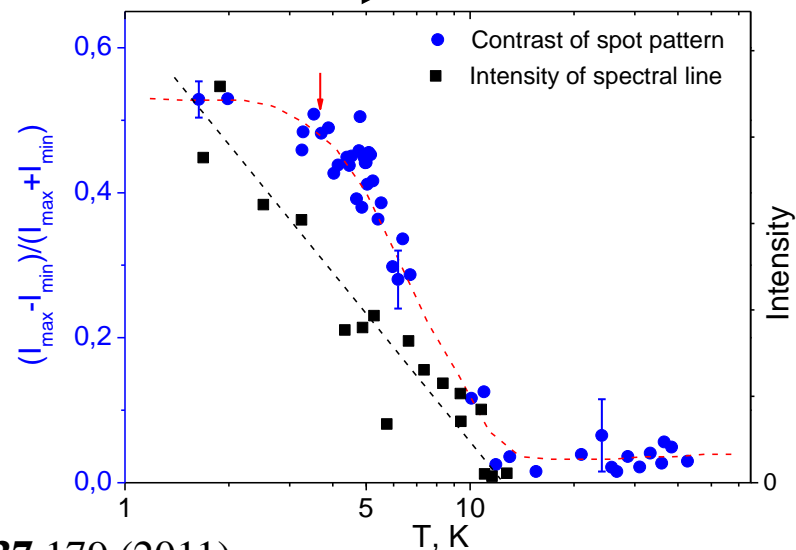
$P = 5 \mu\text{W}$



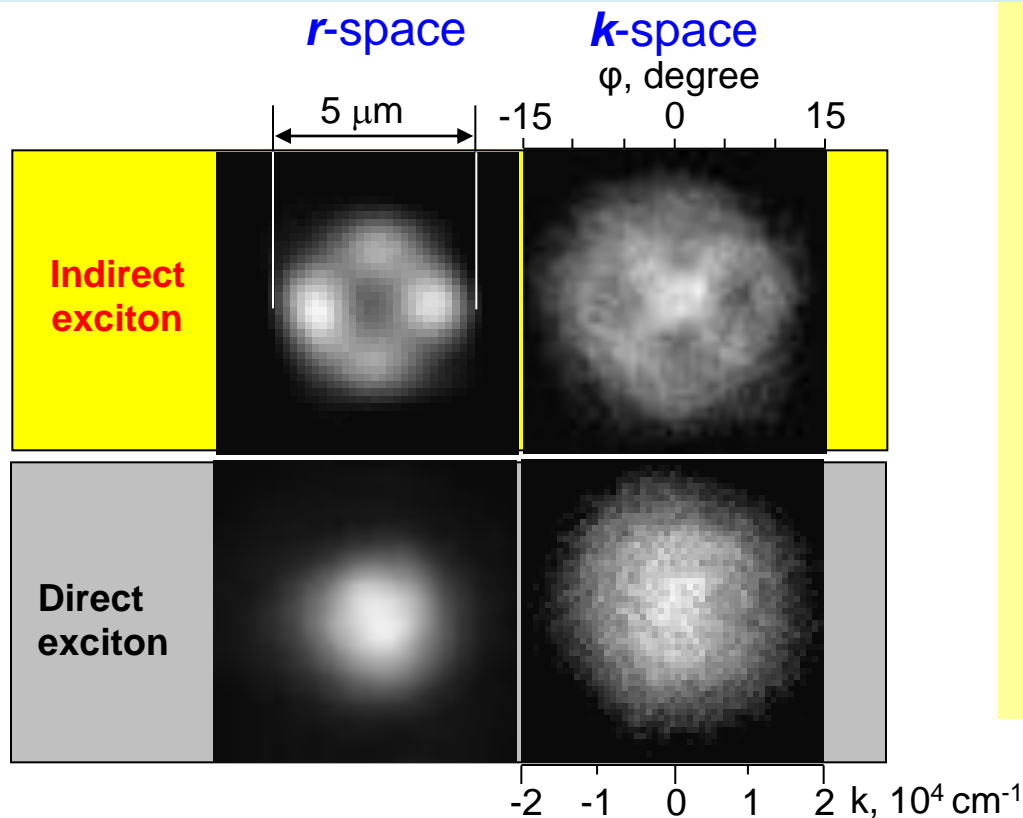
Temperature \longrightarrow

• Контраст пятен люминесценции с ростом накачки проходит через максимум и исчезает с ее дальнейшим увеличением.

• С температурой контраст падает ступенчатым образом: (начало ступени – вблизи 4 К). Узкая спектральная линия и пятна исчезают одновременно.



Распределение в дальней зоне (оптическое преобразование Фурье)



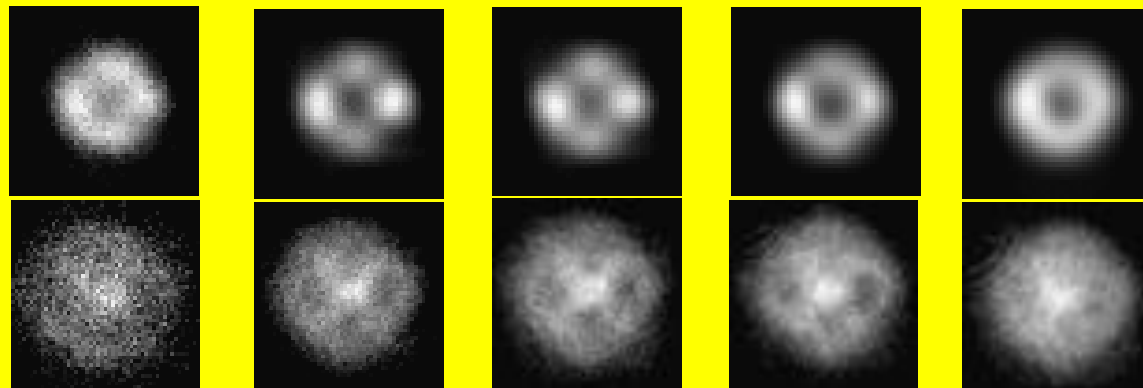
- Часть излучения люминесценции концентрируется вблизи нормали внутри углового конуса:

$$\bullet \Delta\varphi \approx \lambda/D \approx 0.16 \approx 9^\circ$$

$$\bullet \Delta k \approx 10^4 \text{ cm}^{-1} \ll \Delta k_{th} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

- Распределение люминесценции в дальней зоне демонстрирует конструктивную и деструктивную интерференцию. Отсюда следует, что исследуемое коллективное состояние не прямых экситонов пространственно когерентно.

Power



$P_{\text{He-Ne}}$ 0.5 μW

5 μW

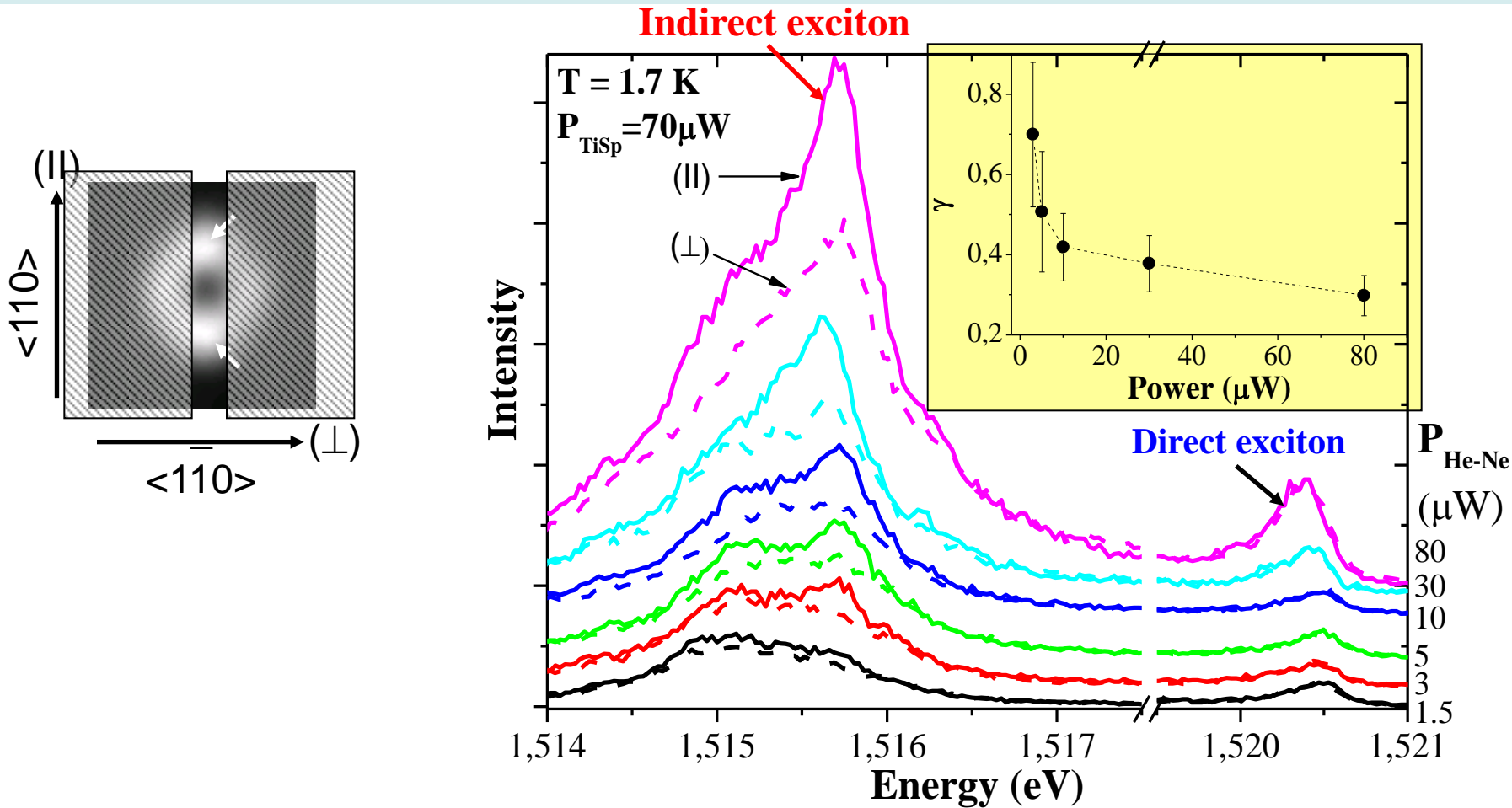
10 μW

50 μW

250 μW

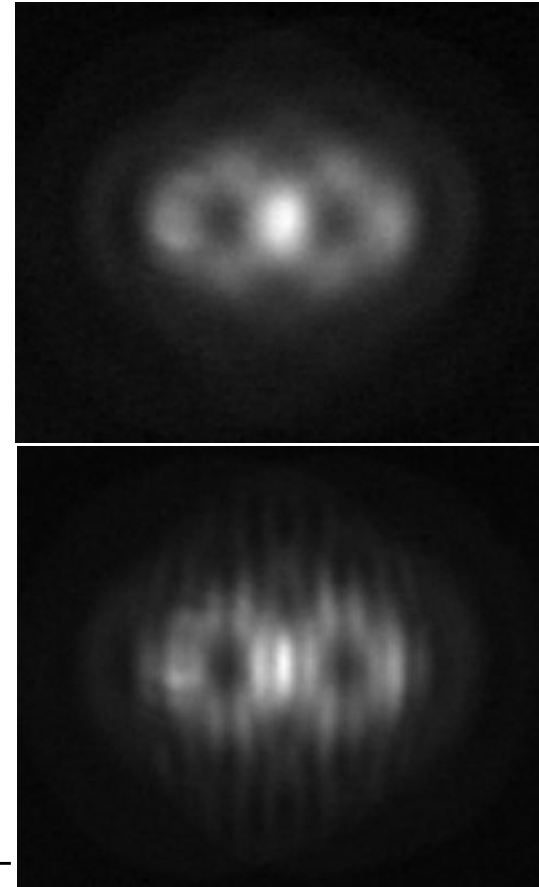
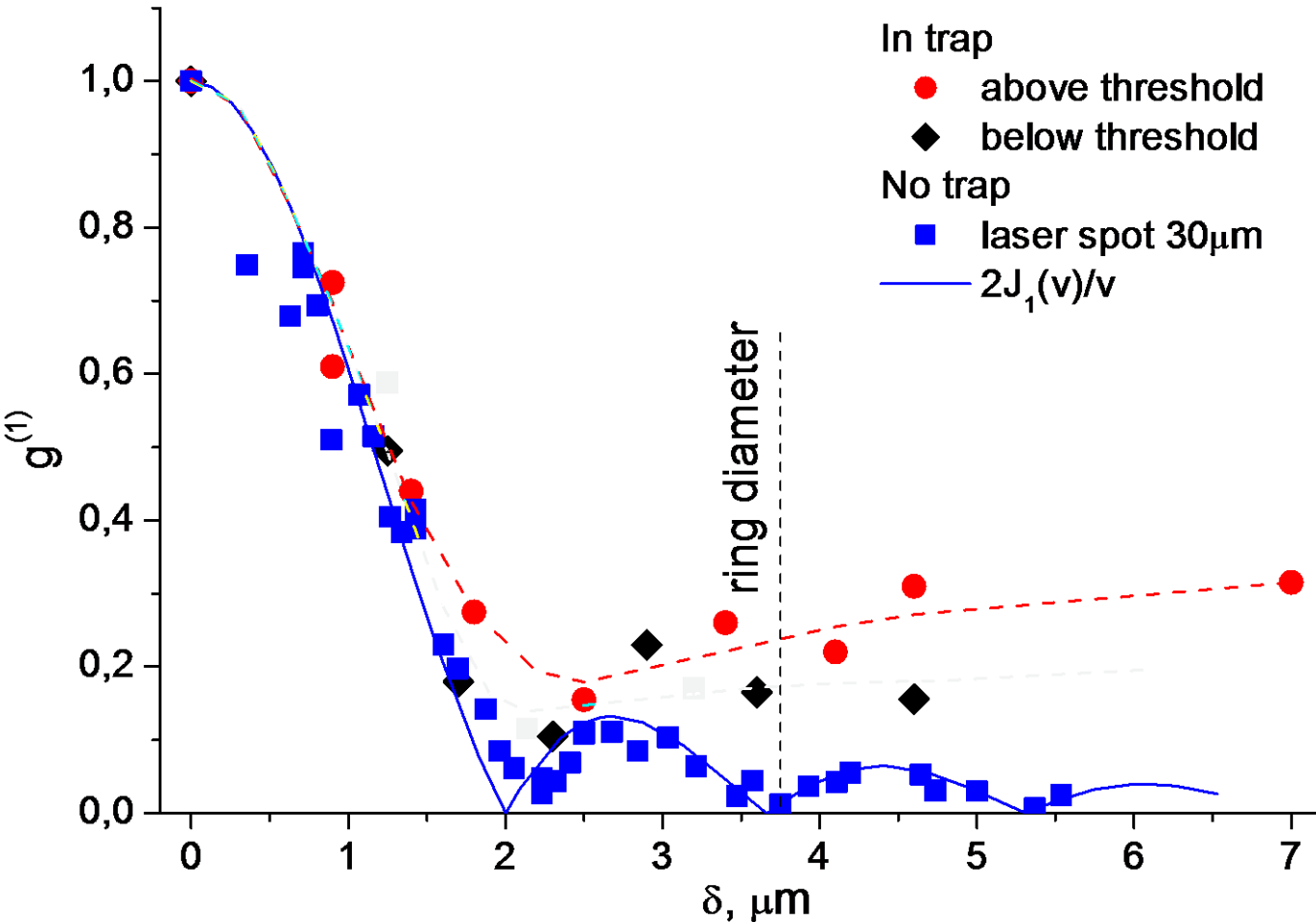
V.B. Timofeev, A.V. Gorbunov,
D.A. Demin, Low Temp. Phys.
37 179 (2011)

Линейная поляризация излучения из пятен



- Узкая линия непрямых экситонов сильно поляризована вблизи порога: степень поляризации γ максимальна вблизи порога ($\approx 70\%$) и снижается с дальнейшим ростом накачки. Линия прямого экситона остается неполяризованной.
- Это явление также свидетельствует о бозе-конденсации диполярных экситонов.

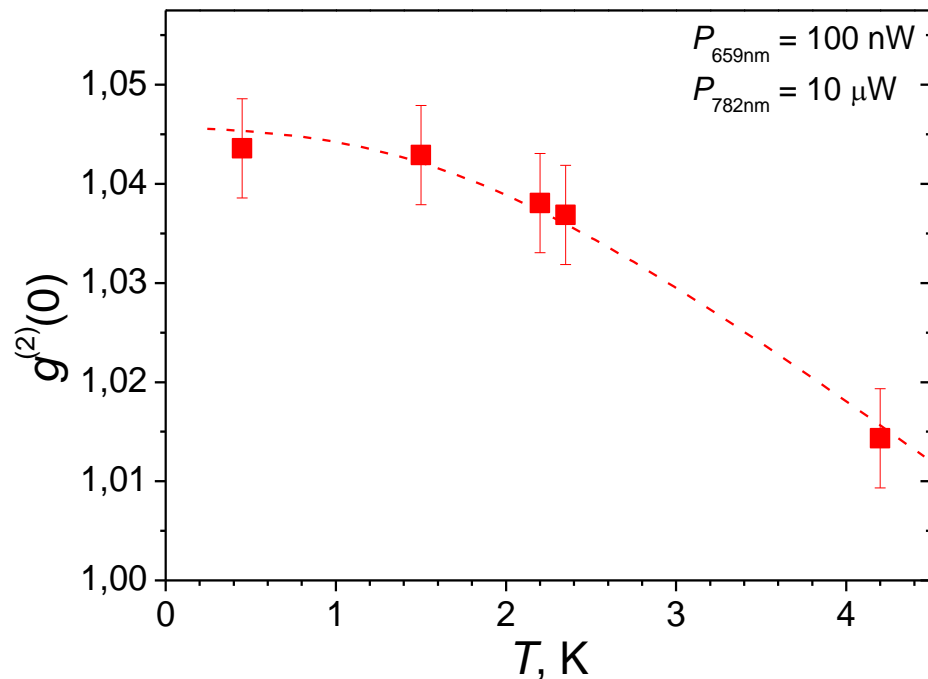
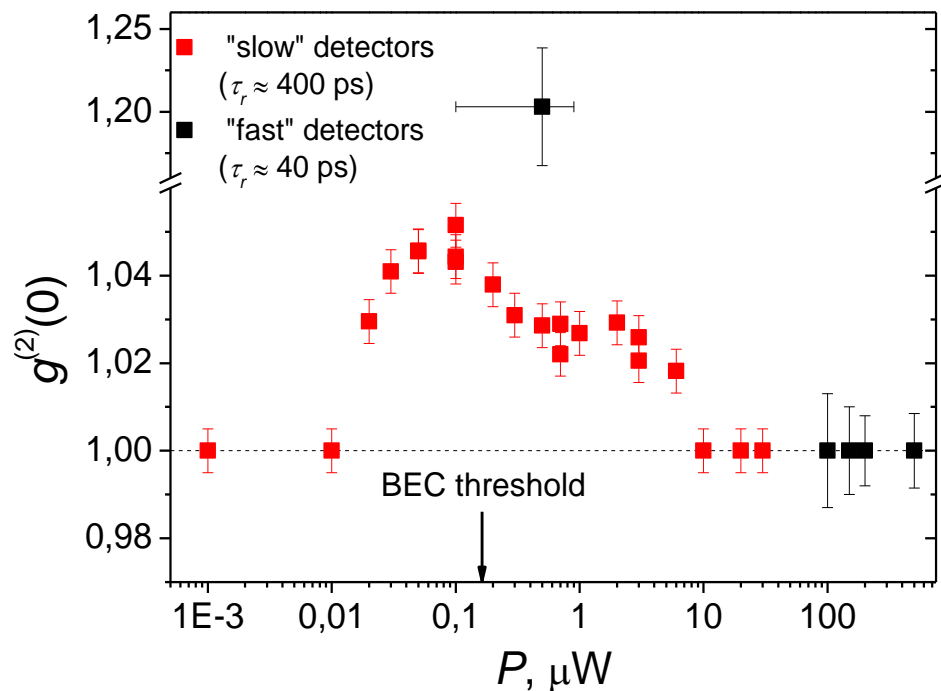
Пространственная когерентность 1-го порядка



- При малых $\delta \leq 1.5 \mu\text{m}$ – как ниже, так и выше порога конденсации – коррелятор 1-го порядка спадает так же, как и в случае 2D-экситонов. Это связано с пространственным разрешением используемой оптической системы.
- При $\delta > 1.5 \mu\text{m}$ в обоих случаях $g^{(1)}$ в ловушке выше, чем без нее. Это эффект малой угловой ширины исследуемого кольцевого светового источника.
- Степень пространственной когерентности экситонов в конденсате – выше!

Временная когерентность 2-го порядка

Двухфотонные корреляции – эксперимент Брауна – Твисса (НВТ)



Группировка фотонов (*bunching*) при $\tau=0$ наблюдается в широкой области накачек вблизи порога БЭК. $g^{(2)}(0) = 1$ ниже порога и сильно выше порога. Это свидетельство рождения единого квантового состояния экситонного конденсата в условиях БЭК.

Обнаруженная группировка фотонов чувствительна к температуре. Это может свидетельствовать о разрушении параметра порядка с температурой.

Bose gas of dipolar excitons collected in the ring trap: properties

- **Spectrally narrow luminescence line** ($\approx 200 \mu\text{eV}$ FWHM) is observed:
 - 1) it appears in a threshold way with pumping power;
 - 2) it decreases quickly with temperature (no line at $T < T_c \approx 10 \text{ K}$);
 - 3) it is linearly polarized ($\langle 110 \rangle \{001\}$; polarization degree $> 70\%$ at the
- **Phase diagram** in coordinates “*Pumping Power – Temperature*” corresponds well to the expected linear dependence for a 2D lateral trap:

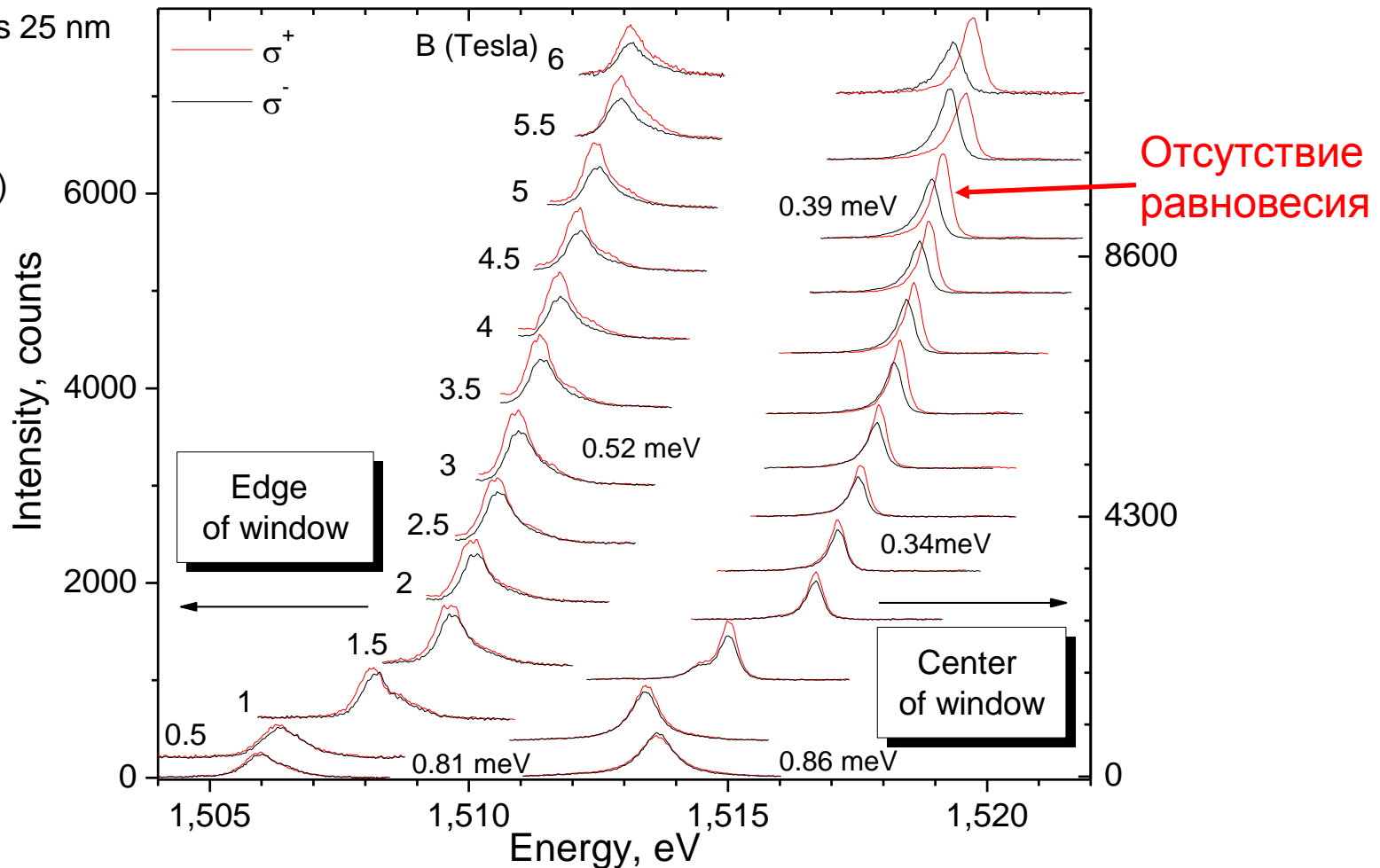
$$T_c \approx 2\pi\hbar^2 N_x / g m_x k_B \ln(SN_x)$$

- **High spatial coherence** of the luminescence:
 - 1) the luminescence light concentrates along the normal to the surface;
 - 2) near- and far-field spatial distributions are correlated (optical Fourier transform);
- **Photon bunching** at the pumping threshold (**single coherent state!?**):
 - 1) 2nd order temporal correlator $g^{(2)}(\tau)$ increases in a broad pumping range around the threshold, $g^{(2)}(0) > 1$;
 - 2) the correlator decreases at very strong pumping, $g^{(2)}(0) \rightarrow 1$;
- **Luminescence spots** (**vortices!**):
 - 1) the spot contrast increases with exciton density, but at very strong pumping it diminishes to null (homogeneous ring);
 - 2) the spots disappear with temperature,

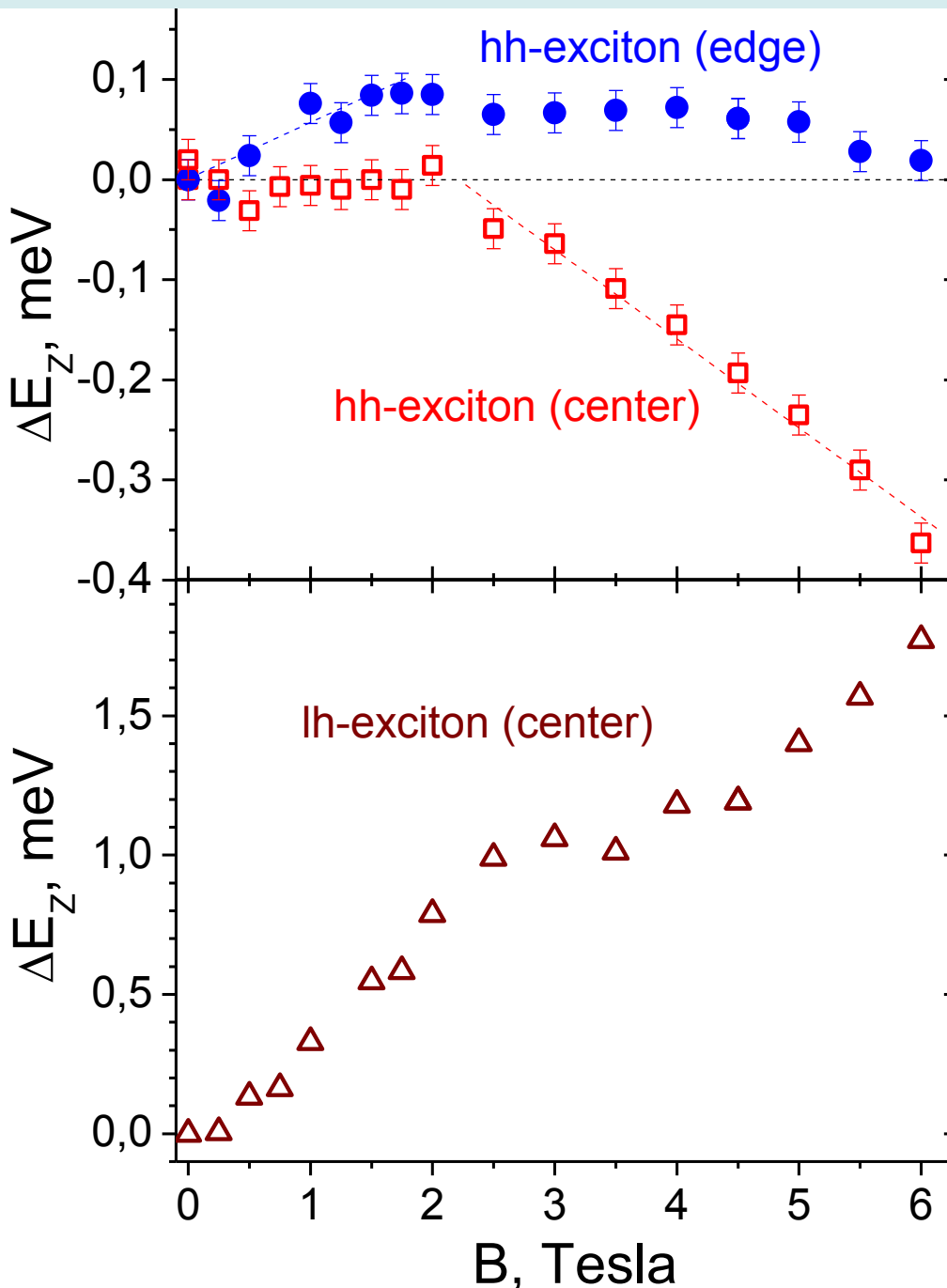
Attributes of Excitonic BEC!

Кольцевая ловушка - фотолюминесценция в магнитном поле

SQW GaAs/AlGaAs 25 nm
window $\varnothing 7 \mu\text{m}$
 $T = 1.5 \text{ K}$
 $B = 0 \div 6 \text{ Tesla}$
(Faraday geometry)
 $F_{\text{ext}} = 7.5 \text{ kV/cm}$



- С введением магнитного поля B – заметное сужение линий: от ≥ 0.8 мэВ до ≈ 0.5 мэВ на краю и до ≈ 0.3 мэВ в центре отверстия
- В центре, кроме линии экситона на тяжелой дырке (hh), присутствуют слабые ($\sim 10^{-2}$) линии экситона на легкой дырке (lh) и других, более высоких по энергии, возбужденных состояний → **зарядовый баланс в квантовой яме близок к нейтральному (!)**



- В центре отверстия **спиновое расщепление для диполярного hh-экситона на тяжелой дырке скомпенсировано** (с точностью ± 10 мкэВ) вплоть до $B_c \approx 2$ Т, а при $B > 2$ Т растет линейно по полю с $g_x \approx -1.5$ (выше по энергии σ^+ -компонента)

- В том же самом месте, при тех же условиях, расщепление для lh-экситона на легкой дырке монотонно увеличивается при $B \geq 0$ с эффективным $g_x \approx +7$ подобно тому, как это происходит в квантовой яме GaAs/AlGaAs шириной 25 нм без электростатической ловушки в однородном пятне фотовозбуждения

- На краю отверстия $\Delta E_Z(B)$ для hh-экситона ведет себя обычным образом для AlGaAs/GaAs квантовой ямы шириной 25 нм (!)

Магнитоэлектрическая ловушка для дипольных экситонов

• Пространственно-неоднородное электрическое поле $F(r)$ в отверстии в затворе Шоттки: кроме перпендикулярной компоненты F_z , есть и параллельная, в плоскости квантовой ямы, F_{xy}

• **В скрещенных полях**, магнитном B и электрическом F , экситон движется в направлении $B \times F \rightarrow$ дисперсионная кривая $E(k)$ сдвигается \rightarrow минимальной энергией обладают экситоны с конечным импульсом $k \neq 0 \rightarrow$ оптический переход с испусканием фотона – не прямой в импульсном пространстве \rightarrow увеличение радиационного времени жизни экситона \rightarrow более глубокое охлаждение экситонной подсистемы

• В круглом отверстии – радиально-симметричное распределение электрического поля \rightarrow возможно «закручивание» экситонов по кольцевой траектории

Phys. Rev. B **85**, 14285 (1996)
Inhibition of spontaneous emission from quantum-well magnetoexcitons

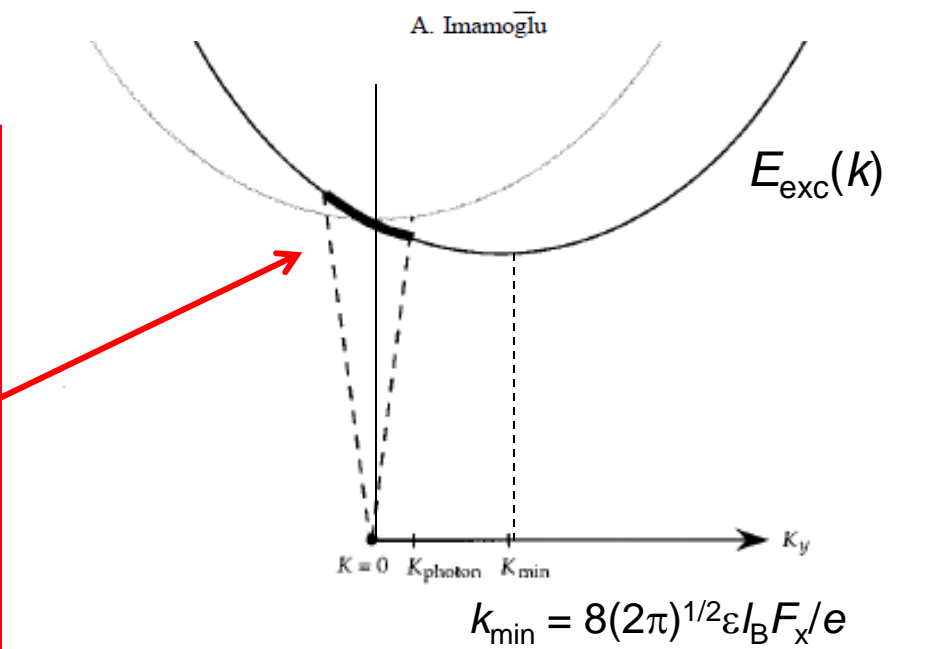
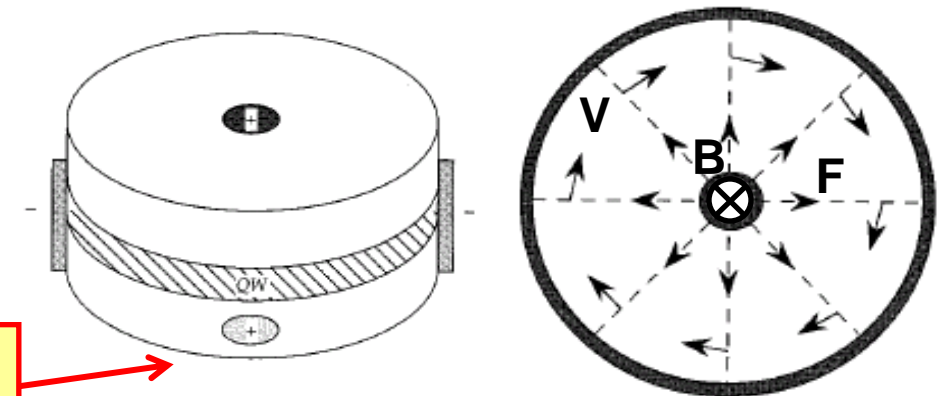
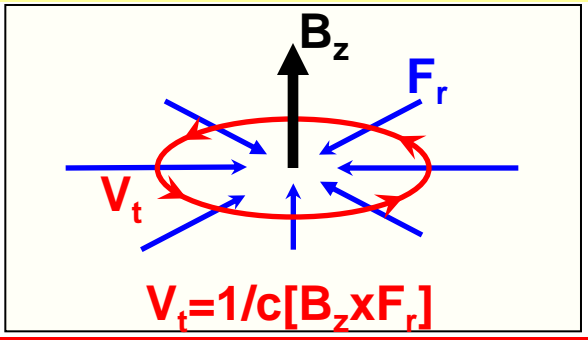


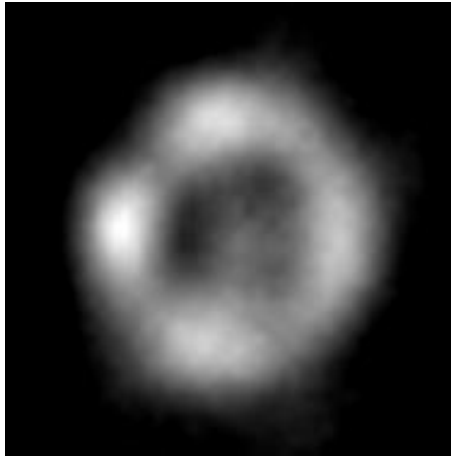
FIG. 1. The dispersion curve of magnetoexcitons with (black curve) and without (gray curve) an applied in-plane electric field. The dotted lines correspond to the dispersion curve of the free electron. Only those excitonic states that lie in between the dotted lines decay by radiative recombination.



Похожая по сути идея эксперимента у А. Imamoglu

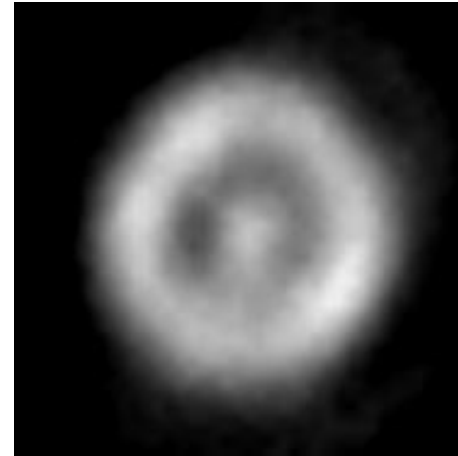
Пространственное распределение люминесценции hh -экситона на краю отверстия

Без магнитного поля



$B = 0$

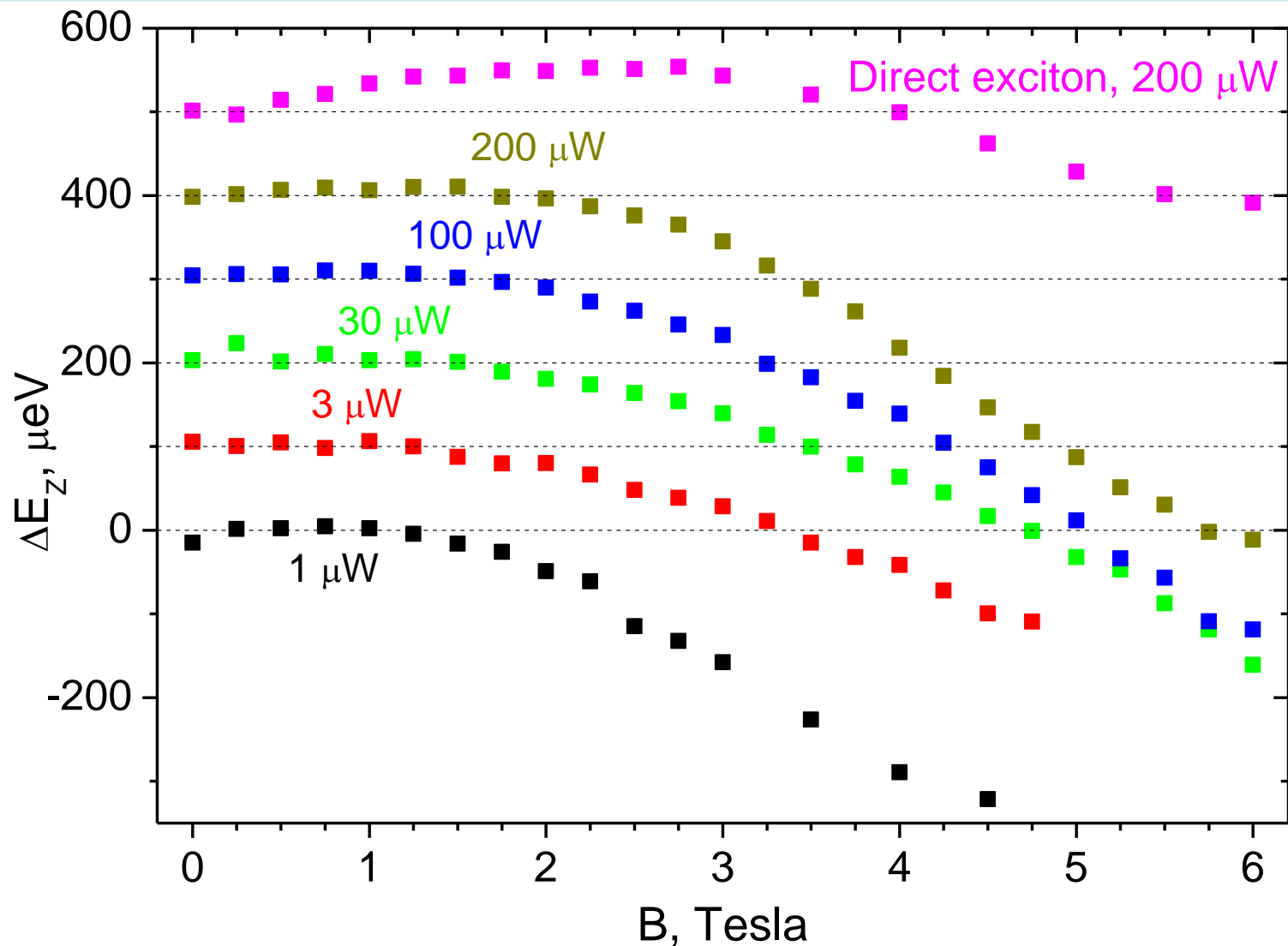
В магнитном поле



$B = 3 \text{ Tesla}$

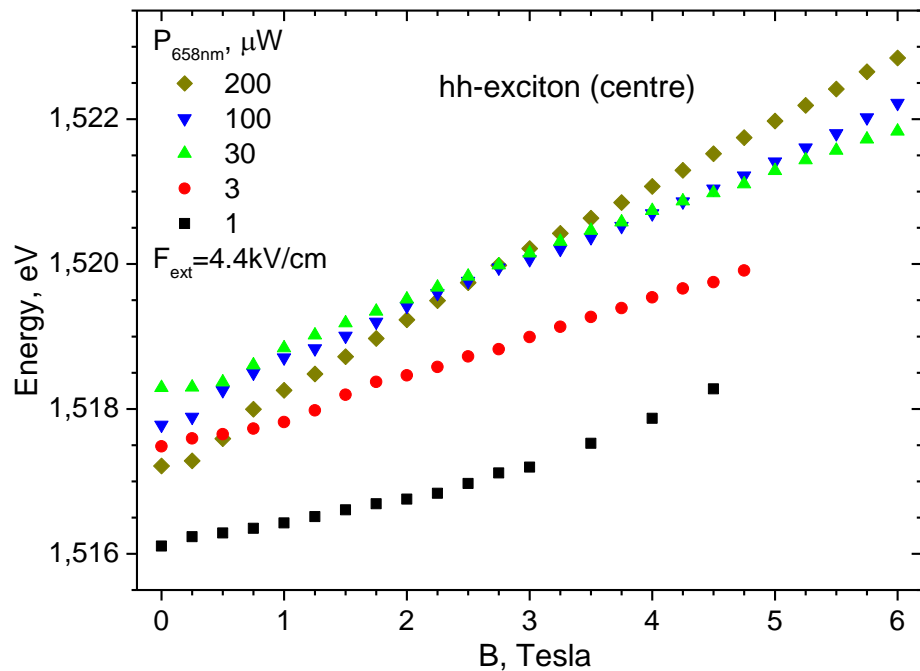
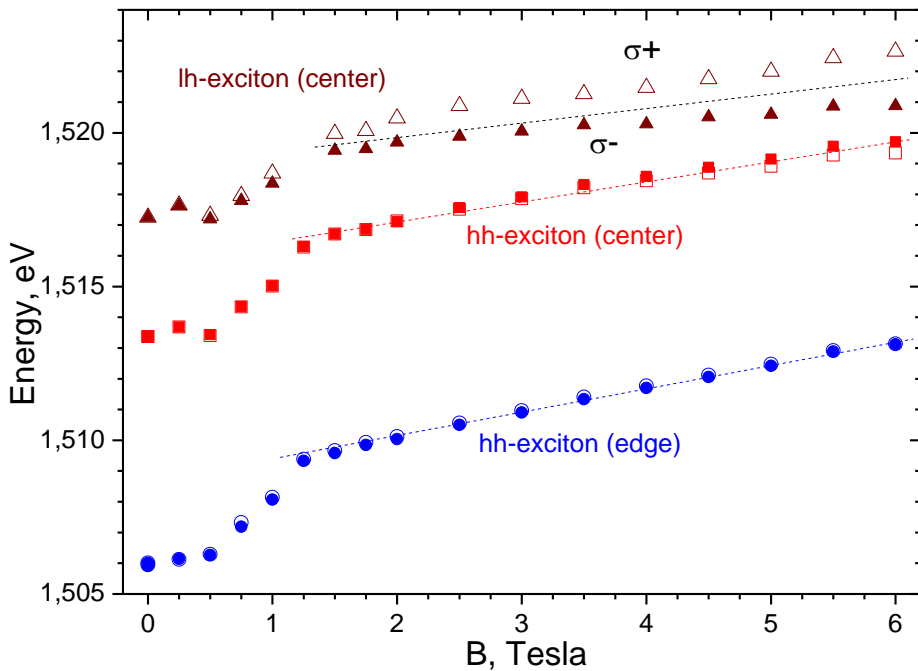
- Магнитное поле существенно изменяет пространственное распределение экситонной плотности в кольцевой электростатической ловушке → **характерная структура с пятнами люминесценции исчезает**
- **Пятна размываются** в тангенциальном направлении, перпендикулярно радиусу отверстия

Зеемановское расщепление – зависимость от накачки



- **Величина критического магнитного поля B_c увеличивается с накачкой**
- Теория – линейная зависимость от концентрации: $B_c = n(\alpha_1 - \alpha_2)/g\mu_B$
- Сложная зависимость интенсивности люминесценции (концентрации) в центре отверстия от накачки – перераспределение зарядов в неоднородном электрическом поле и др.

Энергия экситона в магнитном поле



- При $B \geq 1.3 \text{ T}$ зависимость $E(B) \sim \hbar \omega_c / 2 = \hbar e B / 2 \mu^* c$, с эффективной приведенной массой $\mu^* \approx 0.071 m_0$ (, хотя $m_e \approx 0.066 m_0$ (здесь циклотронная энергия сравнима с энергией связи экситона))
- В области малых полей, $B \leq 1.3 \text{ T}$, необычно большой, квадратичный по полю, синий сдвиг – до 2.2 мэВ/Т^2 для экситона на краю отверстия (в GaAs-структурах ланжевенковский диамагнитный сдвиг обычно $< 0.1 \text{ мэВ/Т}^2$) **?!**
- Примешивание в скрещенных полях к нижайшему состоянию экситона более высоких состояний с большими угловыми моментами **??**

- В условиях соблюдения как можно меньшего отклонения от нейтральности «гигантский» синий сдвиг не наблюдается при низких уровнях накачки, но его признаки появляются с ростом интенсивности фотовозбуждения
- Остается предположить, что причина все-таки – **нескомпенсированные заряды в квантовой яме**: зарядовый баланс не удается выдерживать при высоких накачках

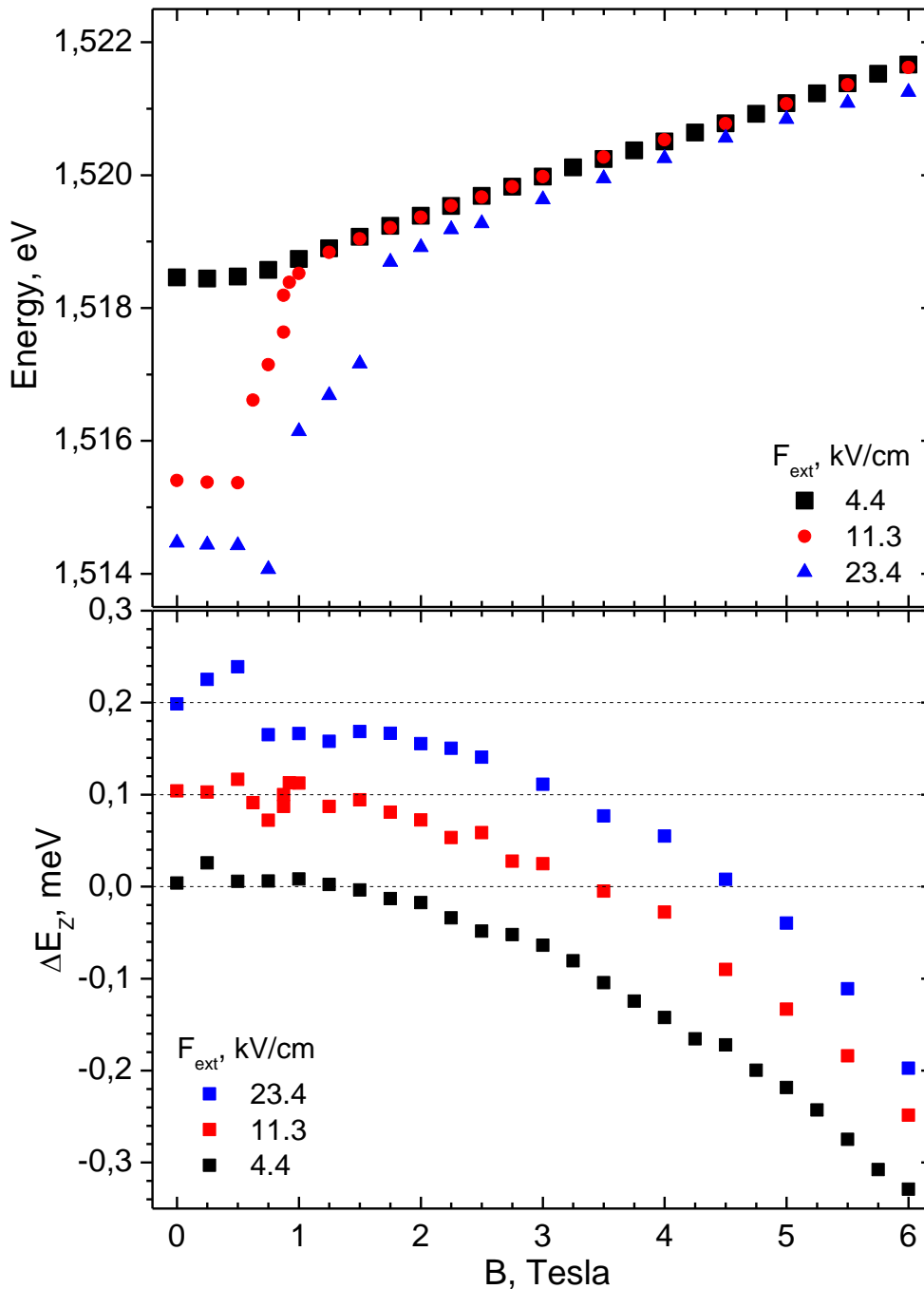
Выводы

- Обнаружена компенсация зеемановского расщепления в магнитном поле $B \leq B_c = 1 \div 2$ Тесла для пространственно-непрямых hh -экситонов на тяжелой дырке в электростатической ловушке, в центре отверстия в затворе Шоттки
- Природа эффекта компенсации связана с обменным взаимодействием в плотной вырожденной экситонной бозе-системе
- Наблюдаемый необычно большой синий сдвиг линии экситона в малых магнитных полях – результат одновременного действия скрещенных магнитного и неоднородного электрического полей и наличия нескомпенсированных зарядов
- Конфигурация скрещенных полей в отверстии в затворе Шоттки порождает движение экситонов по кольцевым орбитам вокруг оси отверстия, что подтверждается влиянием магнитного поля на пространственное распределение люминесценции непрямых экситонов в кольцевой электростатической ловушке на краю отверстия
- В исследуемой системе hh -экситонов на тяжелой дырке термодинамическое равновесие в спиновой подсистеме отсутствует – необходимо переходить к системам с более долгоживущими экситонами

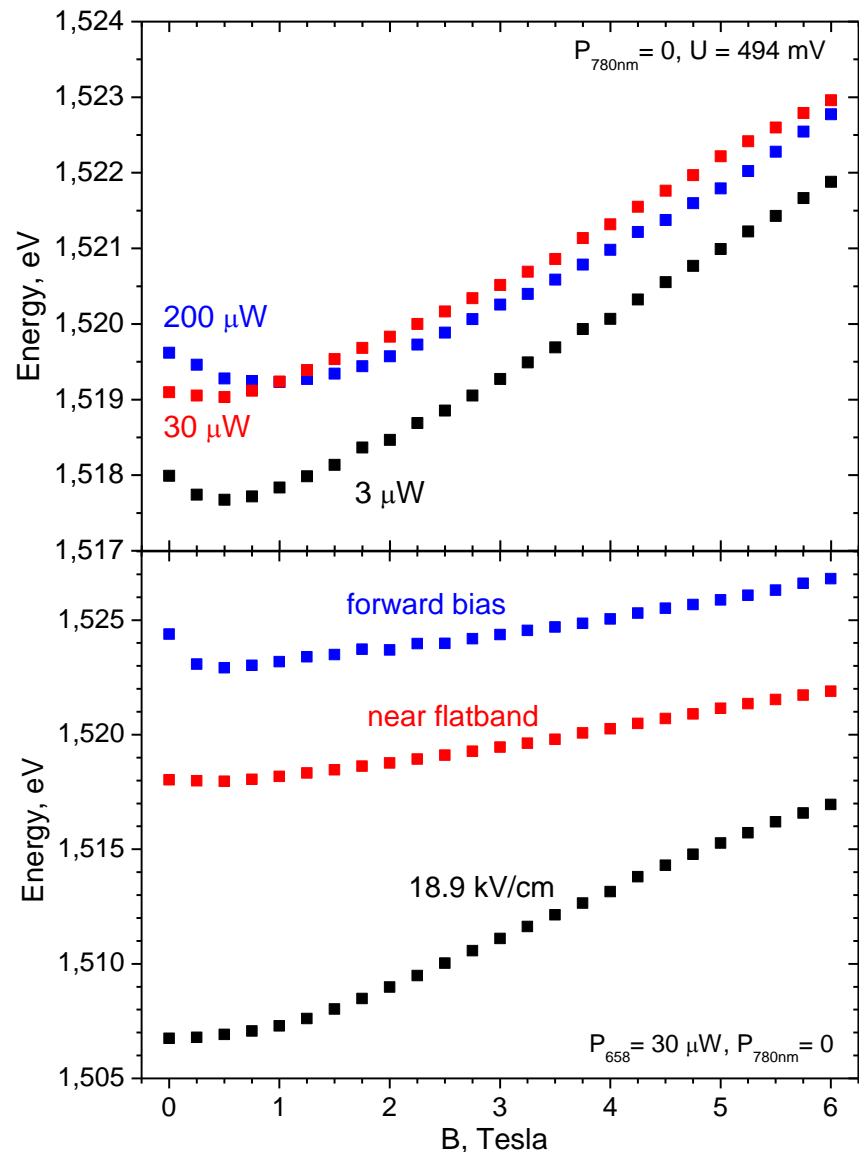
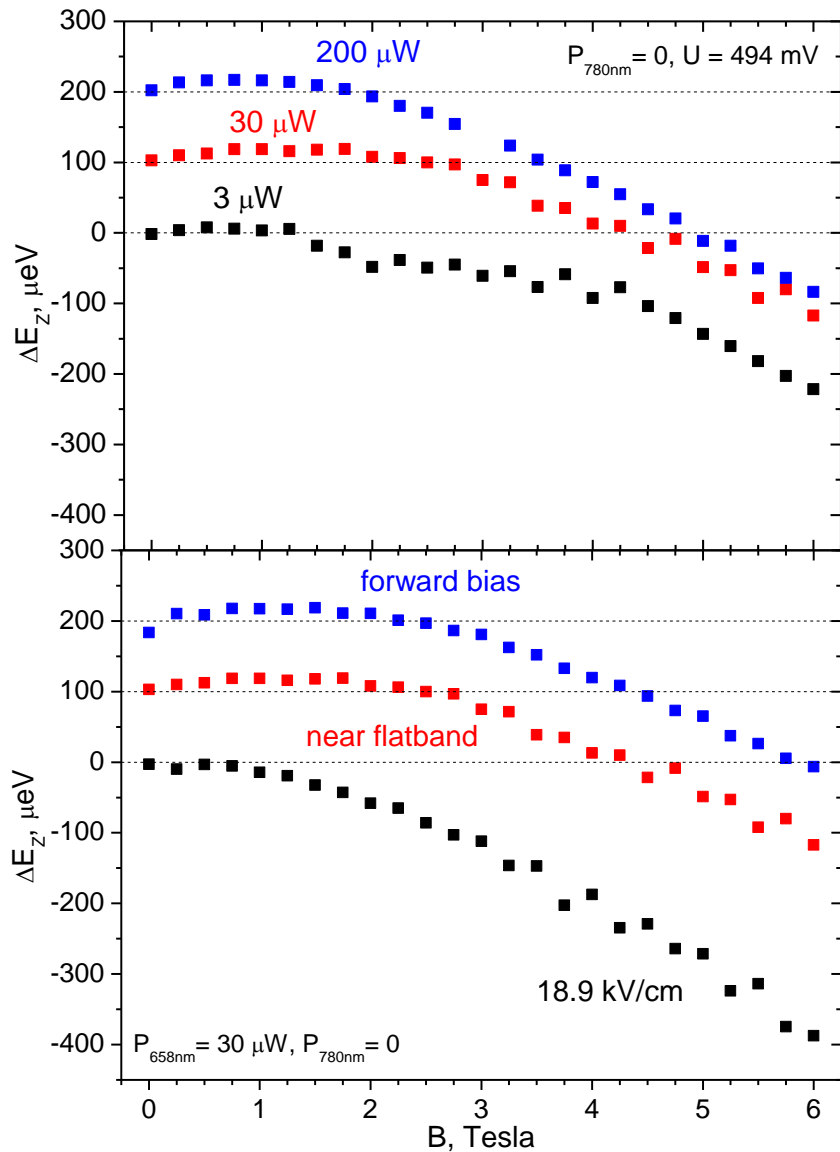
Кольцевая ловушка с заряженной квантовой ямой

- С увеличением приложенного внешнего электрического поля нарастает зарядовый разбаланс и, как следствие, появляется и **растет «гигантский» синий сдвиг**
- В области относительно слабых магнитных полей небольшие изменения напряженности магнитного поля могут приводить к резким изменениям в спектре фотолюминесценции (форма и положение линии)

- В заряженной квантовой резкие эволюции в спектре сказываются также и на спиновом расщеплении
- В целом его поведение становится еще более сложным

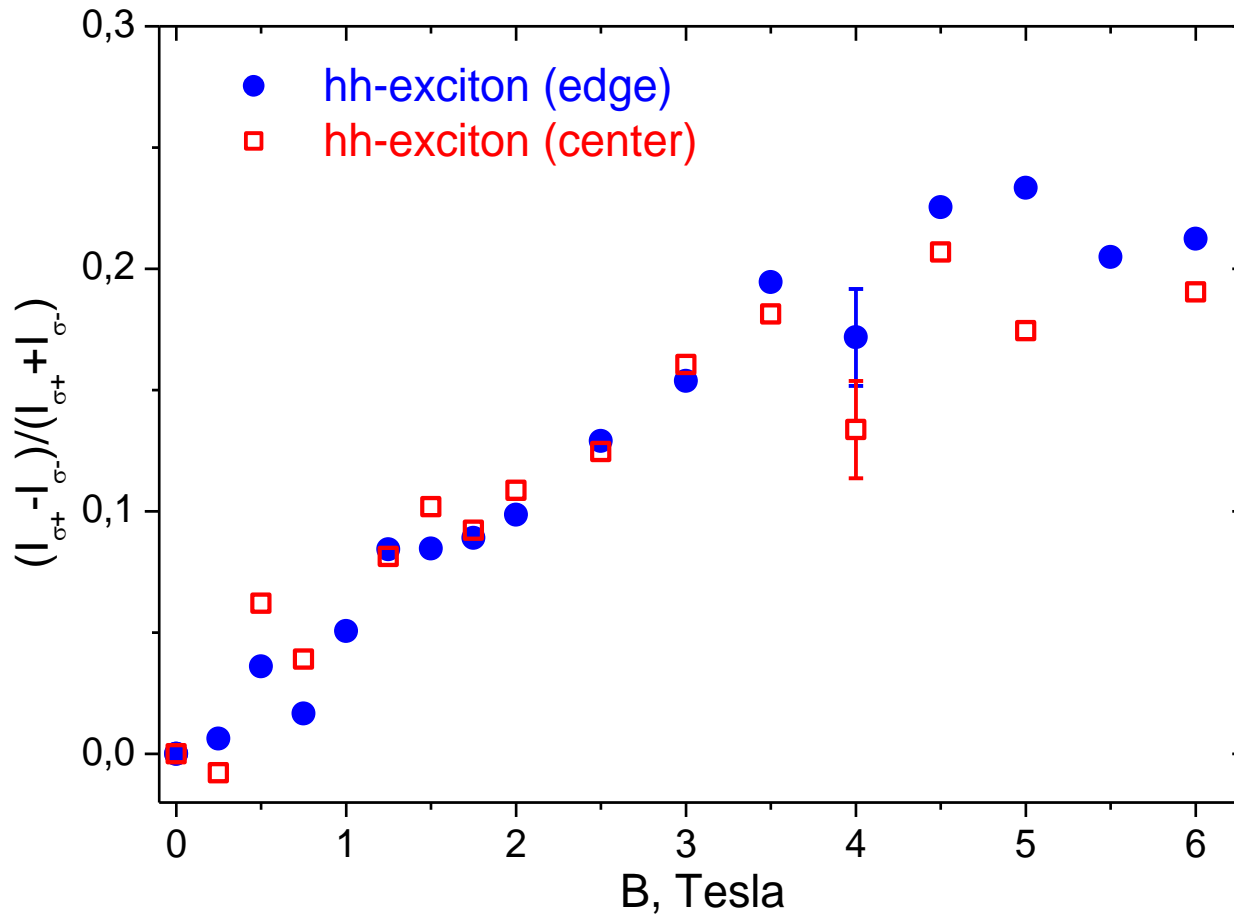


Пространственно-непрямой экситон без ловушки



- Без электростатической ловушки никаких скачков в слабых магнитных полях не наблюдается
- О полной компенсации спинового расщепления говорить не приходится, но отклонение от нуля меньше, чем в случае прямого экситона

Степень циркулярной поляризации



Степень поляризации
 $(I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}) / (I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-})$,
где I_{σ^+} и I_{σ^-} – интенсивности в
максимуме линии в σ^+ - и σ^- -
поляризации, соответственно,
для дипольного hh-экситона
на тяжелой дырке в центре и
на краю отверстия ведет себя в
магнитном поле одинаково

- hh-экситон в центре отверстия: всегда интенсивнее высокоэнергетичная σ^+ -компонента → отсутствует термодинамическое равновесие в спиновой системе
- hh-экситон на краю отверстия: в достаточно больших магнитных полях равновесие тоже отсутствует, т.к. степень поляризации с полем увеличивается, хотя расщепление ΔE_Z уменьшается
- В тех же условиях линия lh-экситона на легкой дырке ведет себя равновесным образом: интенсивнее низкоэнергетичная σ^+ -компонента и степень поляризации растет при увеличении расщепления ΔE_Z

Авторы благодарны:

А. И. Ильину (ИПТМ РАН)

за выполнение электронной литографии при подготовке образцов,

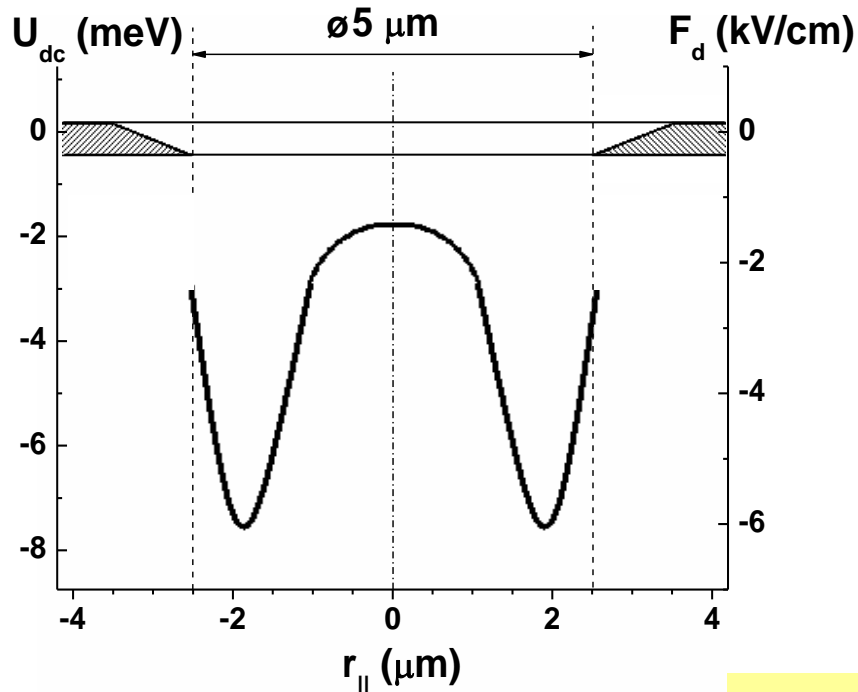
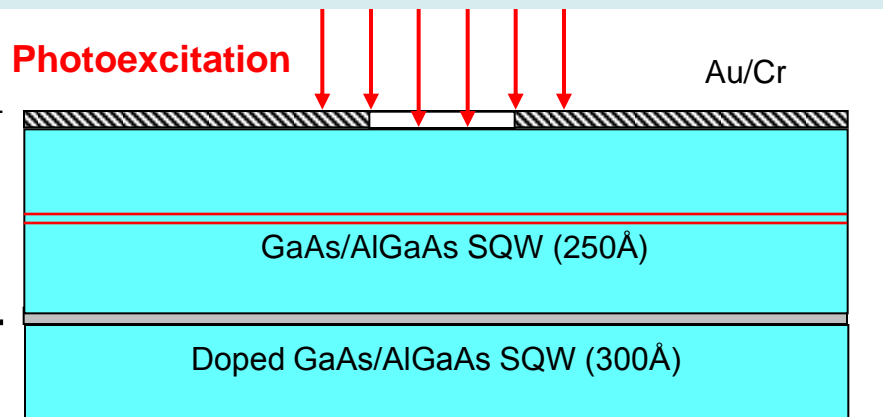
В. Д. Кулаковскому, И. В. Кукушкину, Ю. Е. Лозовику и

Вл. В. Кочаровскому

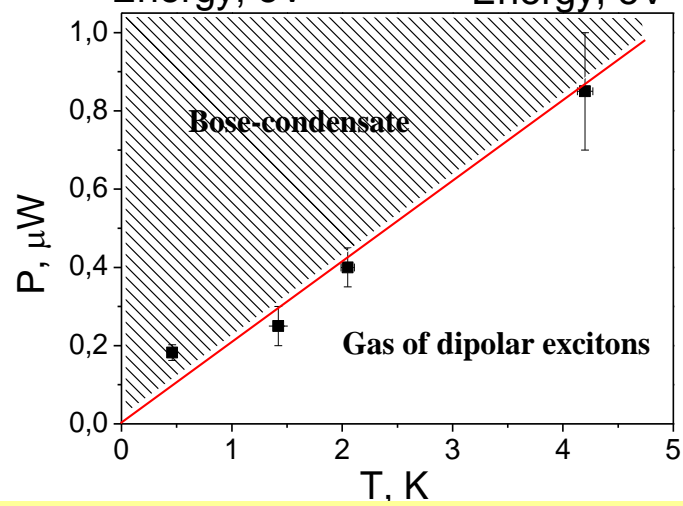
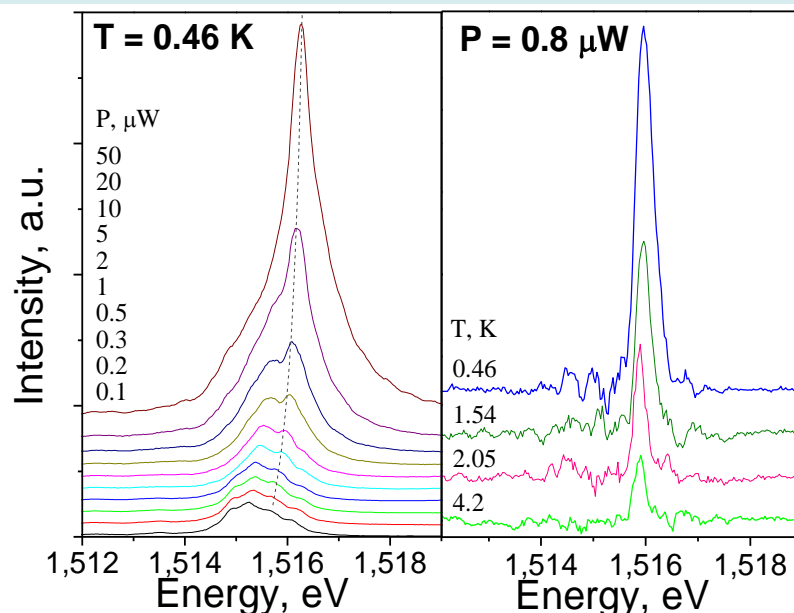
за плодотворные обсуждения

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Программы Президиума РАН по наноструктурам и Программы Отделения физических наук РАН по сильнокоррелированным системам

Кольцевая электростатическая ловушка для дипольных экситонов

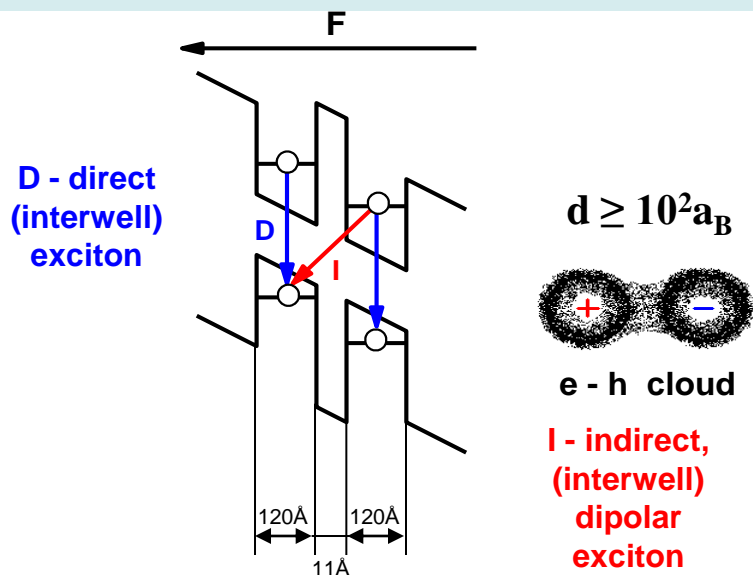


Barrier height $\Delta V \approx 5 \text{ meV} \gg k_B T$

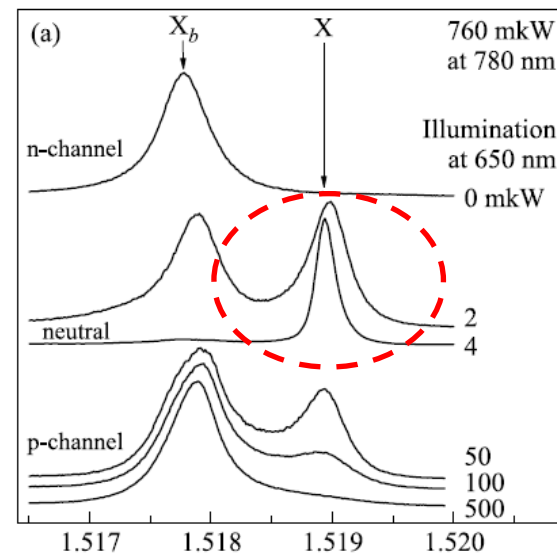
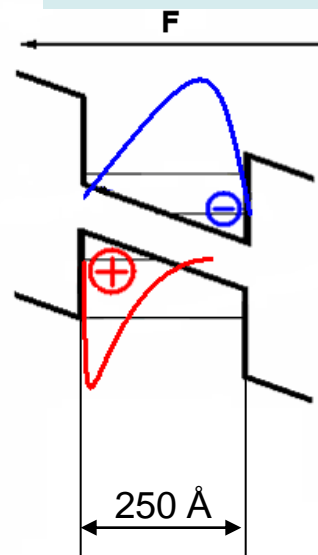


Узкая спектральная линия ($\leq 0.3 \text{ meV}$ FWHM) возникает пороговым образом с ростом накачки P и быстро спадает с температурой $T \rightarrow$ фазовая диаграмма БЭК в координатах “ $P - T$ ”

Двойная квантовая яма (DQW)



Широкая одиночная квантовая яма (SQW)



Lozovik and Yudson (1975), Shevchenko (1976), Fukuzawa (1990), Kash et al. (1992), Butov et al. (1994), Larionov et al. (2000), Snoke et al. (2002), Rappoport et al. (2003)

Пространственное разделение электронов и дырок → пространственно-непрямые дипольные экситоны

Большой дипольный момент в основном состоянии → диполь-дипольное отталкивание → отсутствие экситонных комплексов

Уменьшенное перекрытие волновых функций электрона и дырки → увеличенное излучательное время (10^{-9} - 10^{-5} s) → хорошая возможность для накопления и охлаждения таких экситонов

V.V.Solov'ev, I.V.Kukushkin, Yu.Smet et al. JETP Letters **83**, 553 (2006); A.V.Gorbunov, V.B.Timofeev JETP Letters **84**, 329 (2006)

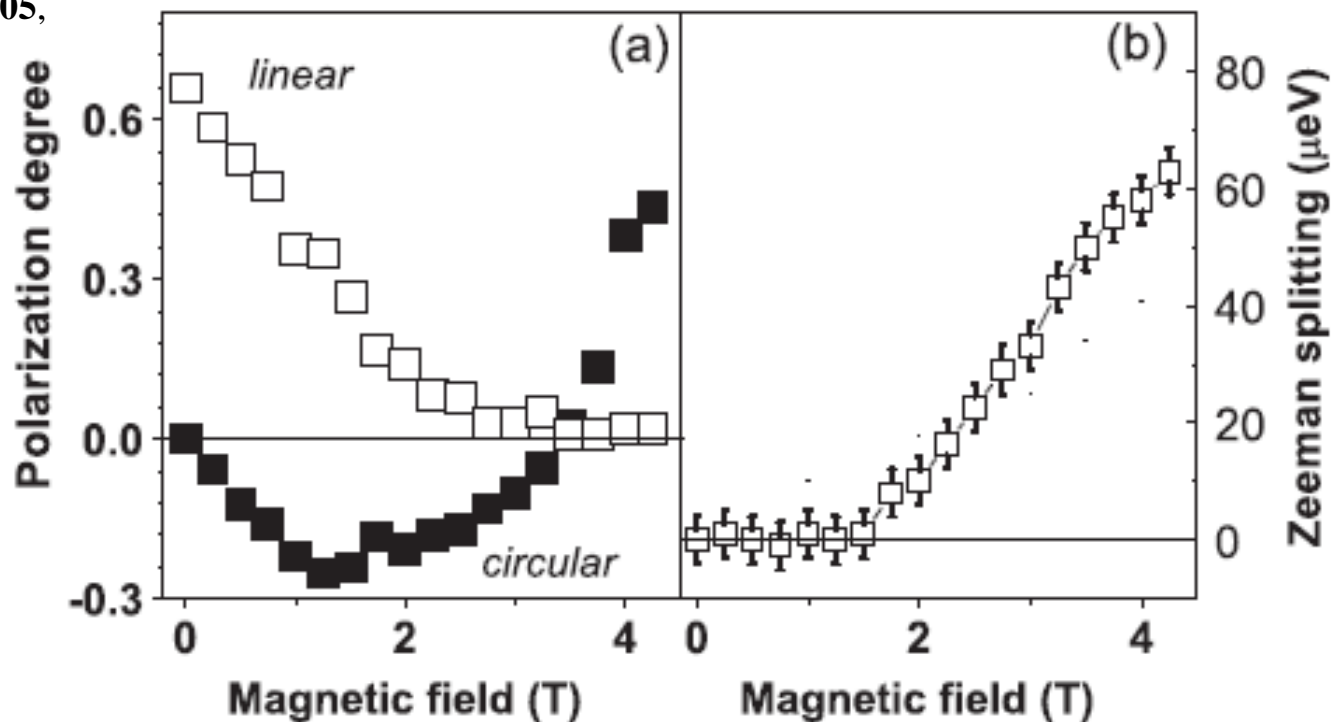
SQW GaAs/AlGaAs 250 Å: отсутствует тонкий межъямный барьер → более высокое качество структуры → ширина линии непрямого экситона ≤ 0.2 meV (FWHM) вместо ≥ 1 meV!

Зарядовый баланс в квантовой яме → им можно управлять, комбинируя над- и подбарьерное фотовозбуждение

Polarized Nonequilibrium Bose-Einstein Condensates of Spinor Exciton Polaritons in a Magnetic Field

A. V. Larionov,¹ V.D. Kulakovskii,¹ S. Höfling,² C. Schneider,² L. Worschech,² and A. Forchel²

Phys. Rev. Lett. **105**,
256401 (2010)



- При $B_c \leq 1.7$ Т расщепление между циркулярно-поляризованными компонентами отсутствует, люминесценция эллиптически поляризована
- При $B_c > 1.7$ Т – линейное по B зеемановское расщепление с g -фактором, обычным для таких квантовых ям
- Знак циркулярной поляризации в эллиптически поляризованном конденсате – отрицательный \rightarrow **отсутствие термодинамического равновесия**