

Loss of coherence in cavity-polariton condensates: Effect of disorder versus exciton reservoir

A. A. Demenev, Ya. V. Grishina, S. I. Novikov, V. D. Kulakovskii, C.
Schneider, S. Höfling

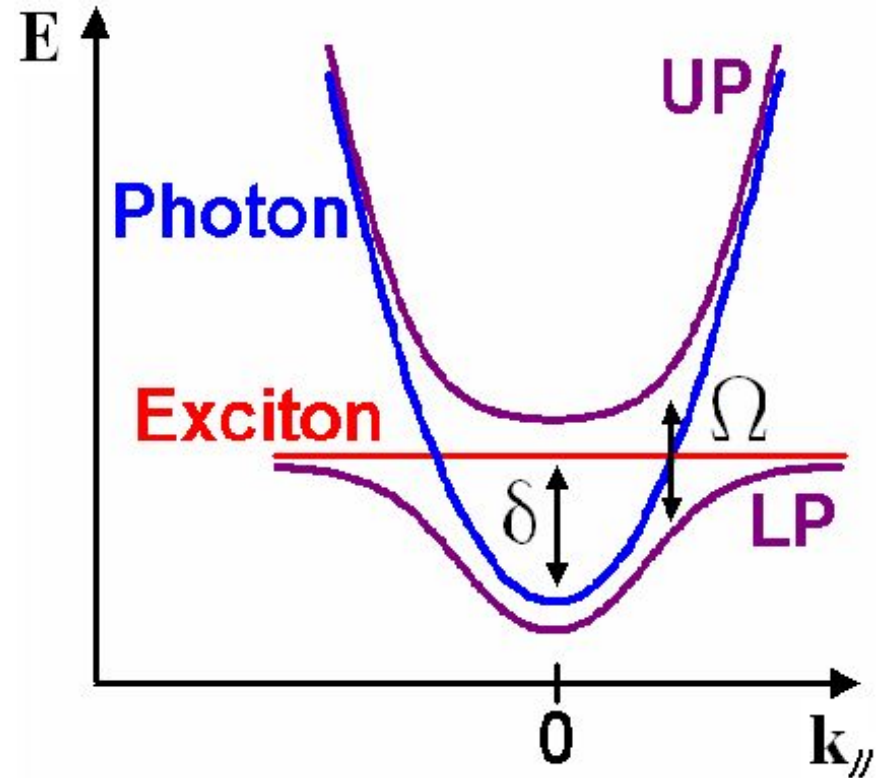
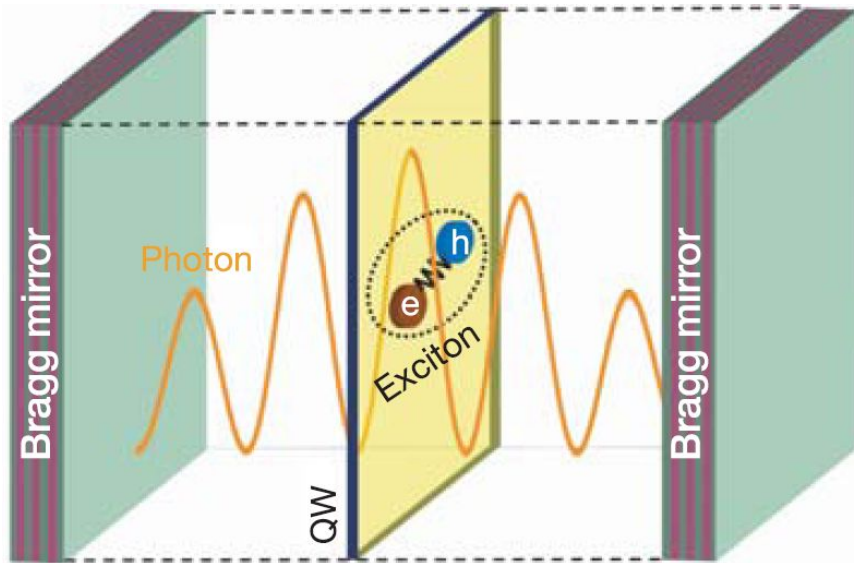
Phys. Rev. B. 94, 195302 (2016).

Polarization instability and the nonlinear internal Josephson effect in cavity polariton condensates generated in an excited state in GaAs microcavities of lowered symmetry

A. A. Demenev, Ya. V. Grishina, A. V. Larionov, N. A. Gippius, C.
Schneider, S. Höfling, V. D. Kulakovskii

Phys. Rev. B 96, 155308 (2017).

Экситонные поляритоны в полупроводниковом микрорезонаторе



Дисперсия фотона в МР:

$$E_{ph}(k) = \hbar c \sqrt{k_z^2 + k_{||}^2} \approx \frac{\pi \hbar c}{L_z} n + \frac{\hbar^2 k_{||}^2}{2m_{ph}}$$

$$m_{ph} = \frac{\pi \hbar}{L_z c} \quad \text{- эффективная масса фотона в МР } (m_{ph} \sim 10^{-4} m_0)$$

Нижняя поляритонная ветка (НПВ):

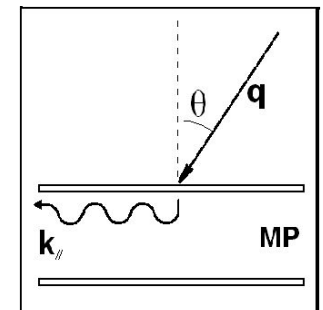
- малая эффективная масса поляритонов вблизи $k_{||} = 0$ ($m_{pol} \approx m_{ph} \sim 10^{-4} m_0$).

- изменяемая глубина НП зоны (посредством изменения L_z или δ)

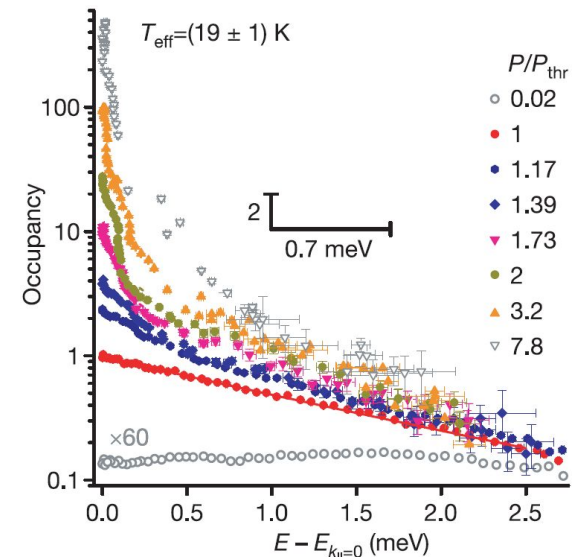
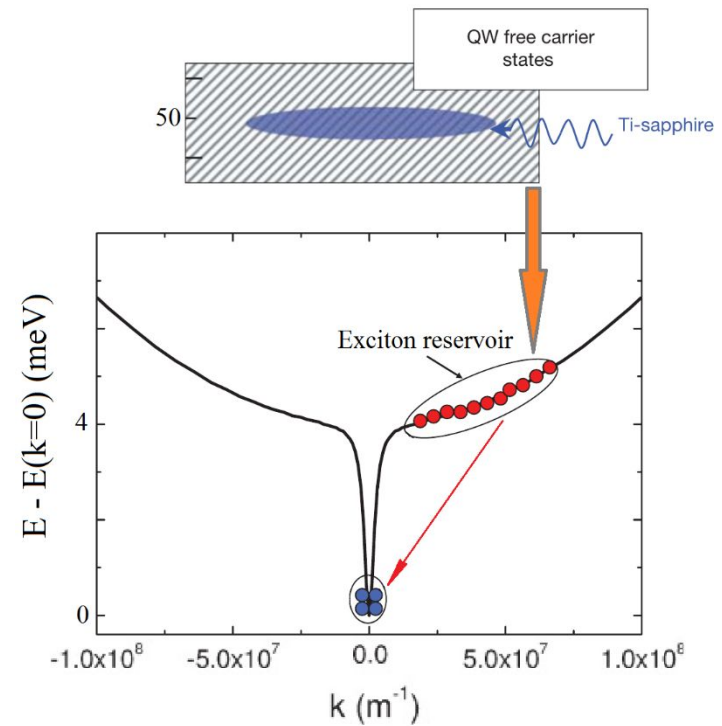
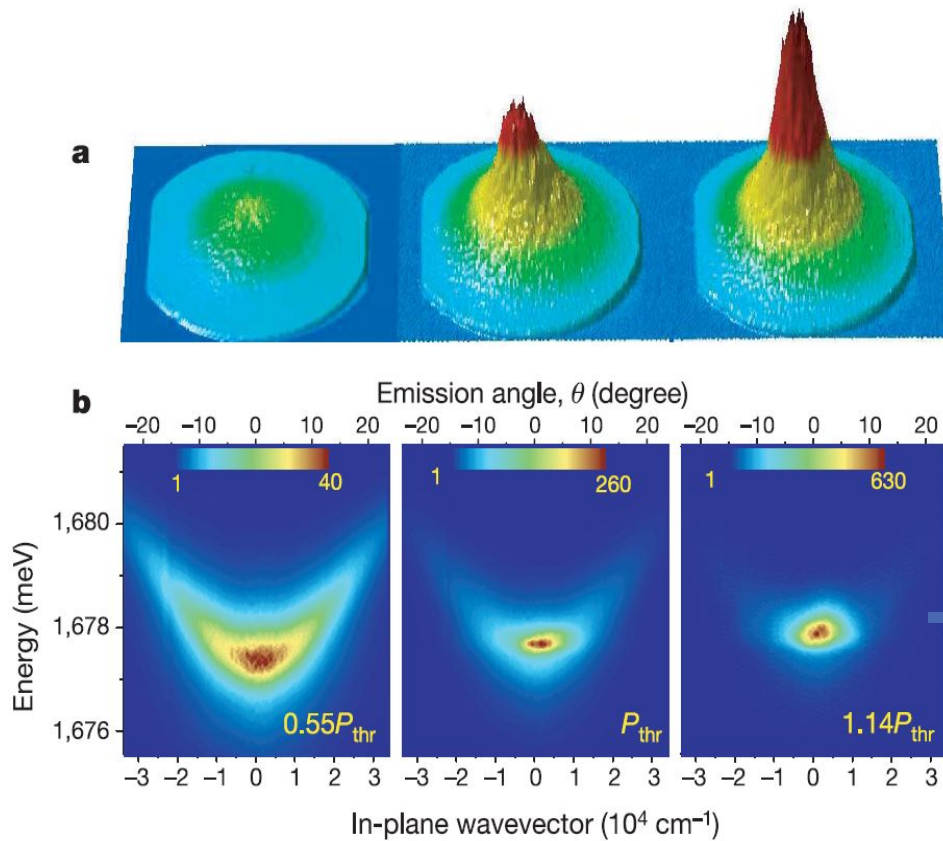
Ω – Раби расщепление

Расстройка фотонной и экситонной мод в $k_{||} = 0$: $\delta = E_{ph}(0) - E_{exc}(0)$

$$|k_{||}| = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$$



Наблюдение неравновесной конденсации поляритонов в МР



Температура конденсации газа поляритонов:

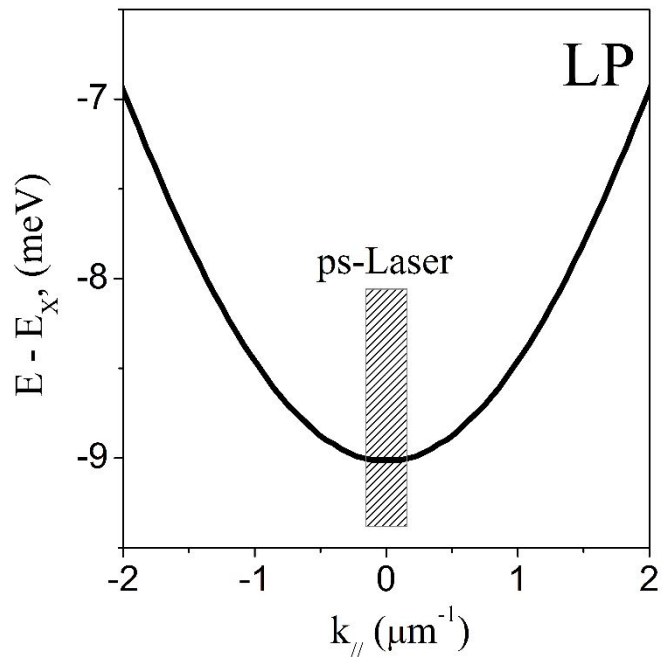
$T_c \sim 10 \text{ K}$ *GaAs, CdTe*

$T_c \sim 100 \text{ K}$ *GaN, ZnO*

J. Kasprzak et al., Nature, 443, 409 (2006)

I. Carusotto, C. Ciuti, Rev. Mod. Phys. 85, 299 (2013)

Схема эксперимента



Резонансное импульсное фотовозбуждение (*Ti-Sr* лазер):

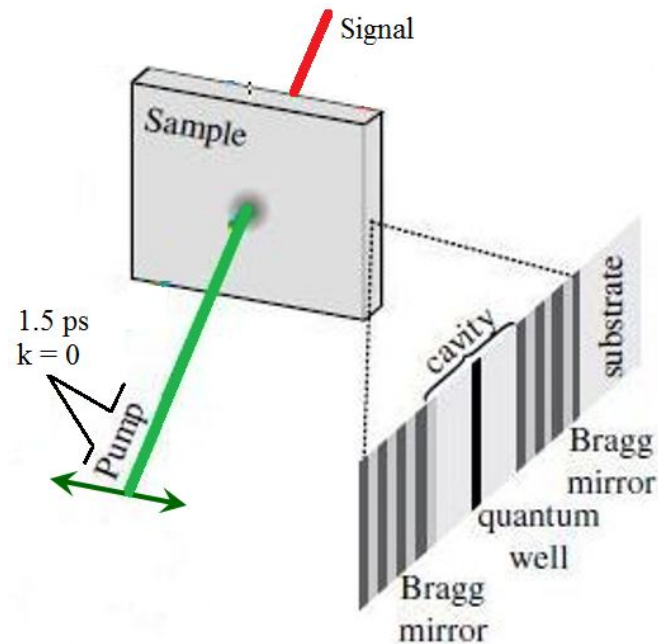
$$k_p = 0 (\pm 1^\circ)$$

$$\hbar\omega_p = E_{LP} + 0.3 \text{ мэВ} = 1618 \text{ мэВ}$$

$$|\rho_{XY}| = 0.99; \rho_c = +0.1$$

$$\tau_p = 1.5 \text{ пс} (\Delta E_p \approx 1.2 \text{ мэВ})$$

$$T = 2.1 \text{ K}$$



Детектирование:

Методика
микрофотолюминесценции
($\approx 1.5 \text{ мкм}$)

Стрик-камера ($\approx 3 \text{ пс}$)

Контролировалась как поляризация возбуждения, так и поляризация сигнала из $k=0$.

Мультистабильность отклика НП.

взаимодействие в спинорной системе поляритонов ($k=0$):

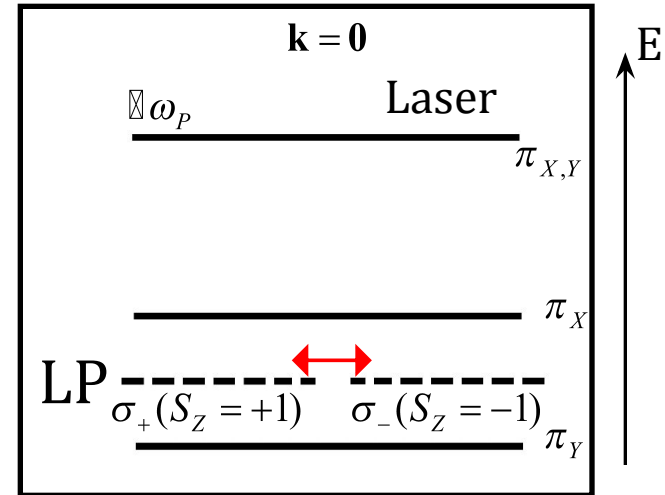
$$V = \alpha_1 (\mathbf{P}_{+1}^+ \mathbf{P}_{+1}^+ \mathbf{P}_{+1} \mathbf{P}_{+1} + \mathbf{P}_{-1}^+ \mathbf{P}_{-1}^+ \mathbf{P}_{-1} \mathbf{P}_{-1}) + \alpha_2 \mathbf{P}_{+1}^+ \mathbf{P}_{-1}^+ \mathbf{P}_{+1} \mathbf{P}_{-1} + g_{xy} (\mathbf{P}_{+1}^+ \mathbf{P}_{-1} + \mathbf{P}_{-1}^+ \mathbf{P}_{+1})$$

$$\alpha_1 \approx 7 \cdot 10^{-13} \text{ мЭВ} \cdot \text{см}^2$$

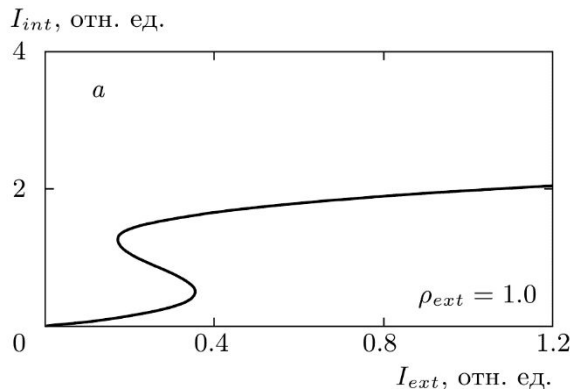
$$\alpha_2 < 0; \quad \alpha_1 / |\alpha_2| \sim 100$$

$$\delta_l = 2g_{xy}$$

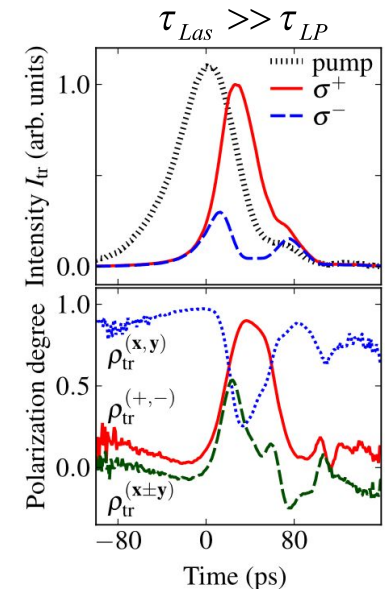
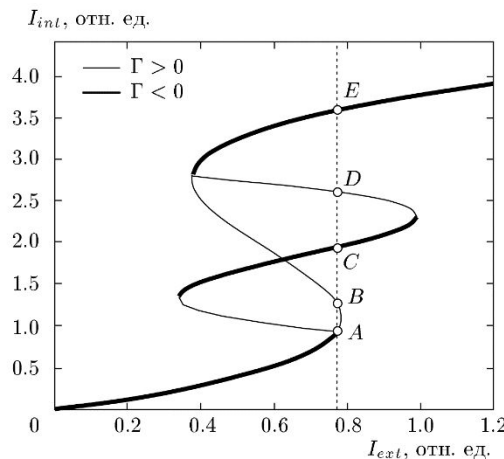
Возможно спонтанное нарушение симметрии циркулярно-поляризованных компонент поля в МР в условиях строго линейной (симметричной по спину) поляризации накачки. “Выбор” конечного состояния определяется малыми флуктуациями поля в критической точке или взаимным расположением σ -уровней НП.



π_Y – накачка



π_X – накачка

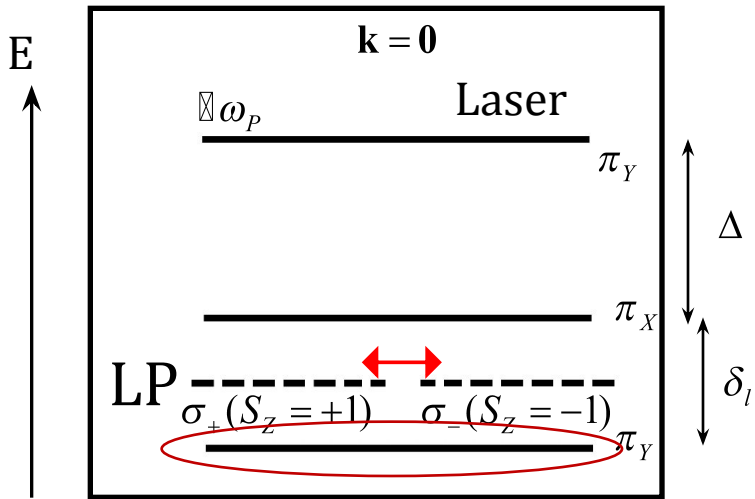


Сигнал из $k=0$ сохраняет поляризацию накачки.

Сигнал из $k=0$ становится циркулярно-поляризованным.

[1] N. A. Gippius *et al.*, PRL **98**, 236401 (2007).
 [2] С. С. Гаврилов *и др.*, ЖЭТФ **137**, 943 (2010).
 [3] С. С. Гаврилов *и др.*, APL **102**, 011104 (2013)

Лазерная накачка в нижний отщепленный подуровень π_y



Накачка (частотная схема):

$$\gamma_{LP} = 70 \text{ мкЭВ}$$

$$\delta_l \approx 110 \text{ мкЭВ}$$

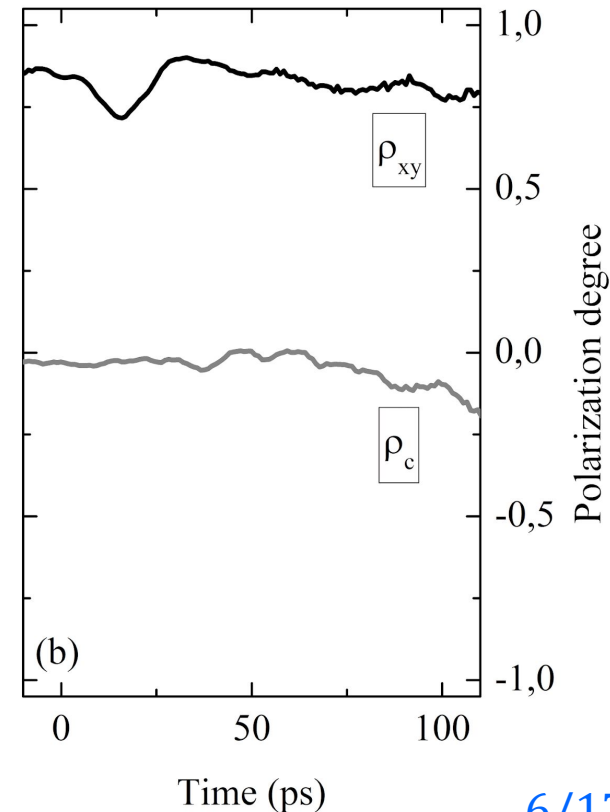
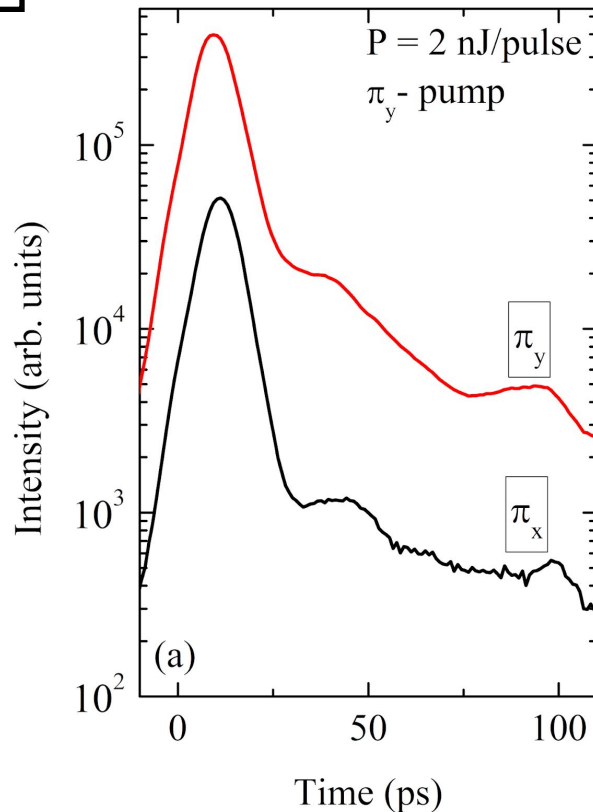
$$\Delta = 300 \text{ мкЭВ}$$

$$\hbar\omega_p = E_{LP}^X + \Delta = 1618 \text{ мЭВ}$$

$$\Gamma_{las} = 1200 \text{ мкЭВ}$$

$$\rho_{12} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

Измерения поляризованных спектров излучения поляритонной системы показали, что π_y поляризация сохраняется в течение длительного времени: степень линейной поляризации уменьшается не более чем на 10% за 100 ps. Такую систему можно рассматривать как скалярную (однокомпонентную).



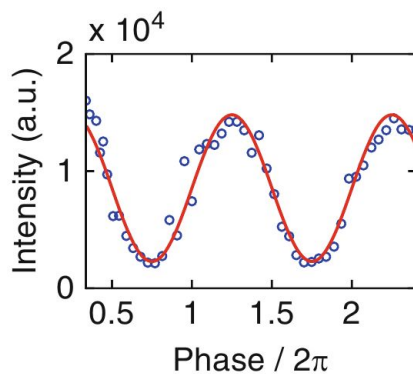
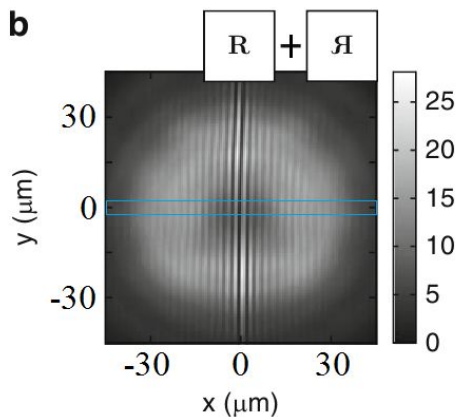
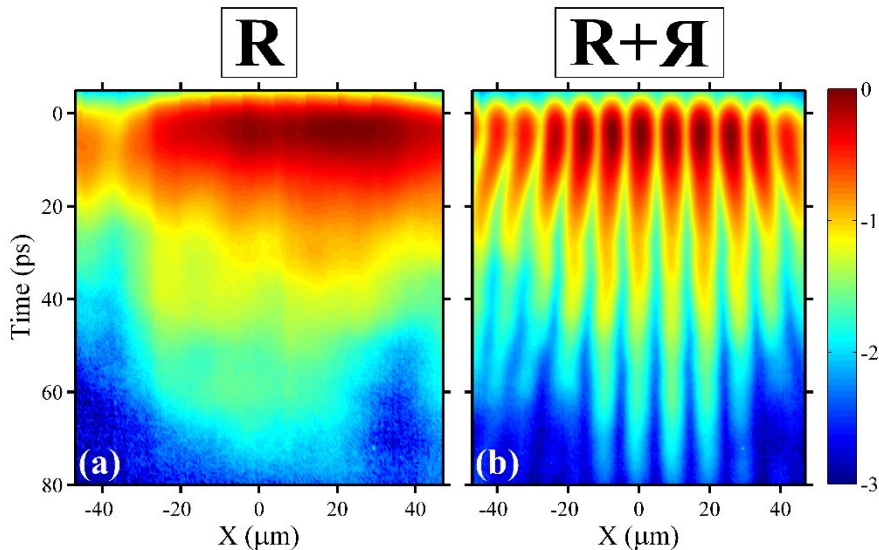
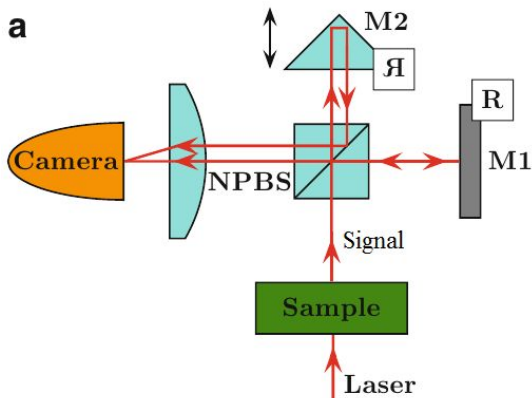
Измерение пространственной когерентности

Лазерная накачка в нижний отщепленный подуровень π_y

Пространственная когерентность задается функцией:

$$g^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{\langle \vec{E}^*(\mathbf{r}_1) \cdot \vec{E}(\mathbf{r}_2) \rangle}{\sqrt{I(\mathbf{r}_1)} \sqrt{I(\mathbf{r}_2)}}$$

Динамика поляритонной плотности и пространственной когерентности в полоске (± 2 мкм) вблизи $Y=0$



$$g^{(1)}(2x, t) = \left[\frac{1+K}{2\sqrt{K}} \right] * \mathbf{V}; \quad K = \frac{\langle I(x, t) \rangle}{\langle I(-x, t) \rangle}$$

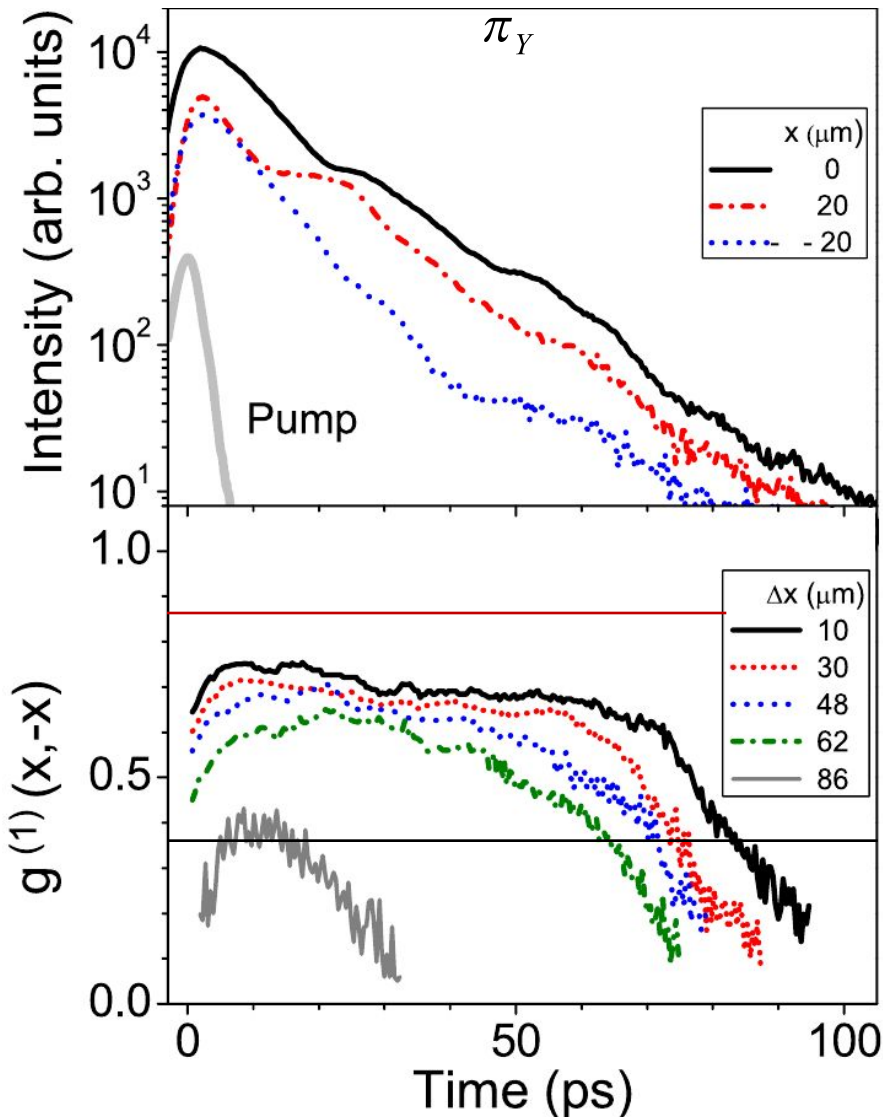
Для определения $g^{(1)}$ нужны:

1. видность V в точке (x, t)
2. интенсивности изображений в точке (x, t)

Когерентность в конденсате НП. Результаты

Лазерная накачка в нижний отщепленный подуровень π_y

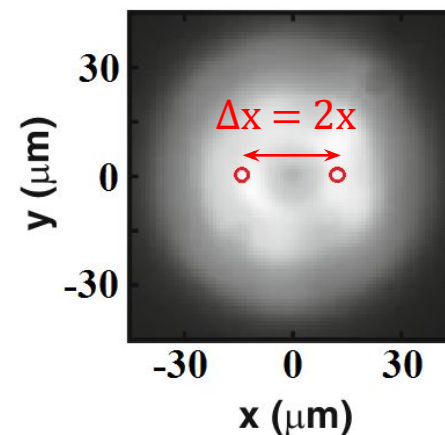
$P = 0.12 \text{ nJ/pulse}$



Пятно накачки: $d = 40 \text{ мкм}$

Время жизни НП в $k=0$: $\tau_{LP} \approx 20 \text{ пс}$

$g^{(1)}$ для лазера: $g^{(1)} \approx 0.87$



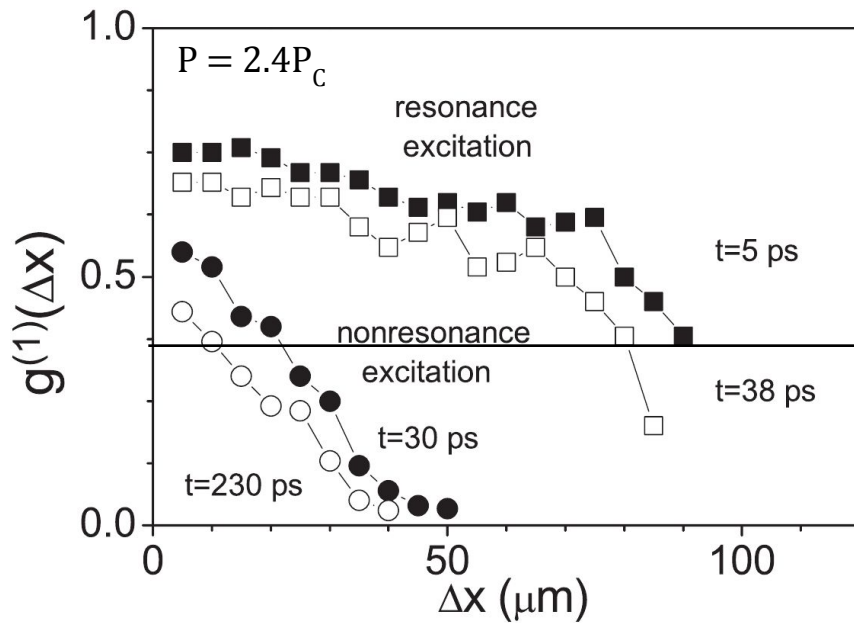
Высокая пространственная когерентность наследуется и сохраняется в газе поляритонов в течение десятков пикосекунд.

Уменьшение $g^{(1)}$ только при $t > 60 \text{ пс}$, когда плотность поляритонов падает в 100 раз.

ОСНОВНОЙ ВЫВОД:

Пустой экситонный резервуар - причина сохранения когерентности поляритонного конденсата при резонансном возбуждении!?

Случаи резонансной и нерезонансной накачки. Результаты

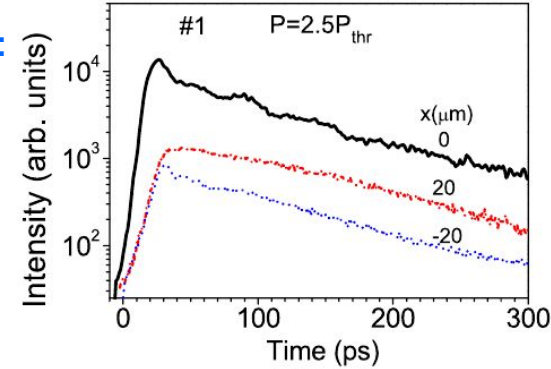


Нерезонансная накачка:

$$\tau_p = 80 \text{ пс}$$

$$\hbar\omega_{nres} = \hbar\omega_{res} + 50 \text{ мЭВ}$$

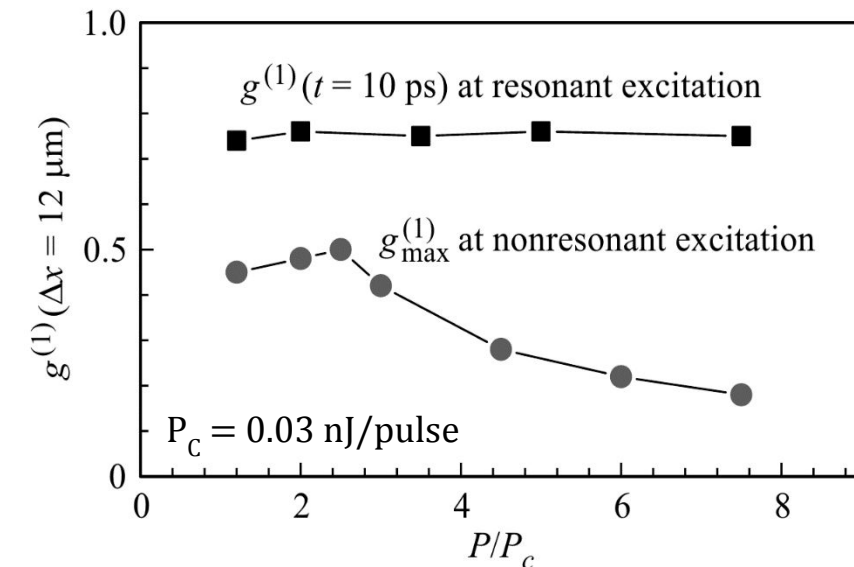
$$d = 40 \text{ мкм}$$



	Нерезонансная	Резонансная
N_{max}	$R_C^{nr} \approx 22 \text{ мкм}$	$R_C^r \approx 4 * R_C^{nr} = 88 \text{ мкм}$
$\frac{N_{max}}{10}$	$R_C^{nr} \approx 10 \text{ мкм}$	$R_C^r \approx 82 \text{ мкм}$

при резонансном фотовозбуждении $g^{(1)}$ почти не изменяется при вариации плотности накачки в 7 раз, при нерезонансном возбуждении $g^{(1)}$ немного растет до $P \sim 2.4P_c$ и затем монотонно уменьшается, но всегда не превосходит 0.5.

при нерезонансной накачке $g^{(1)}$ сильно зависит от заполненности резервуара. Плотный экситонный резервуар – основной источник декогеренции в поляритонной системе.



[1] V. V. Belykh *et al.*, PRL **110**, 137402 (2013).

[2] D. A. Mylnikov *et al.*, JETP Lett. **101**, 513 (2015).

Резонансная модель. Влияние случайного потенциала

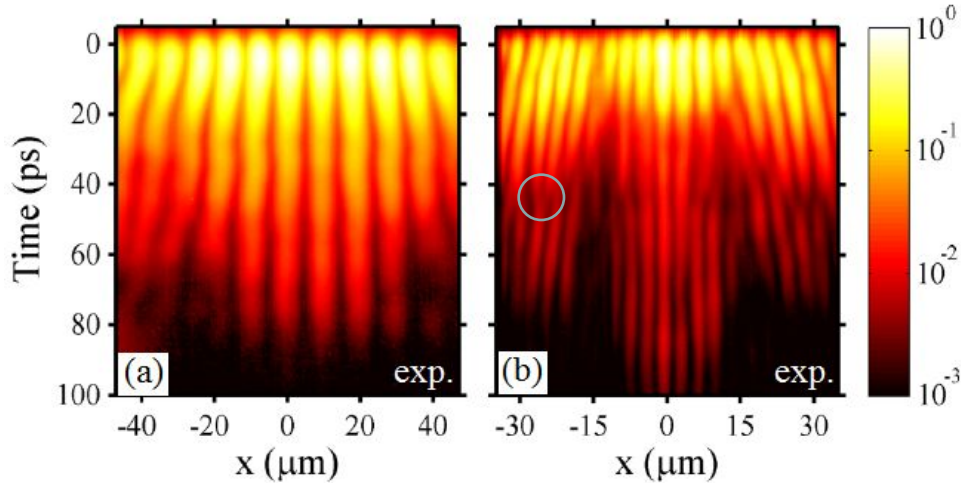
Модель спинорного конденсата НП [1]:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \Psi_+ \\ \Psi_- \end{pmatrix} = \left[E_{LP}(-i\hbar\nabla) + \frac{\delta}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right]$$

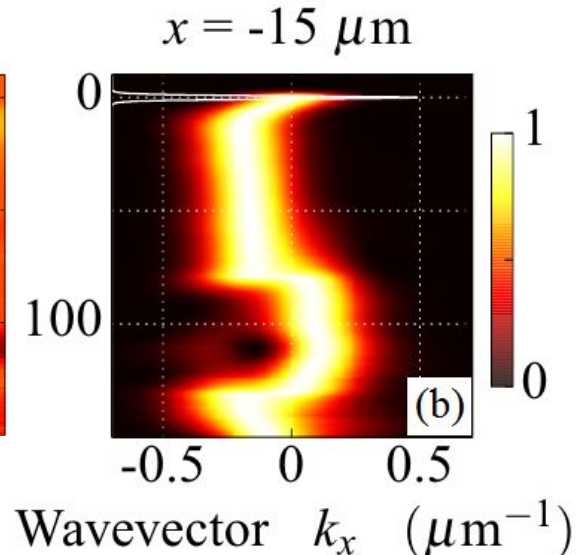
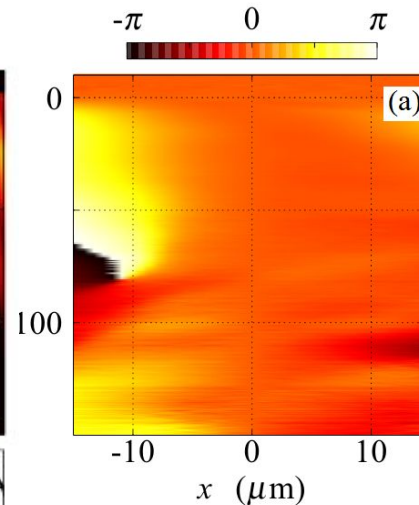
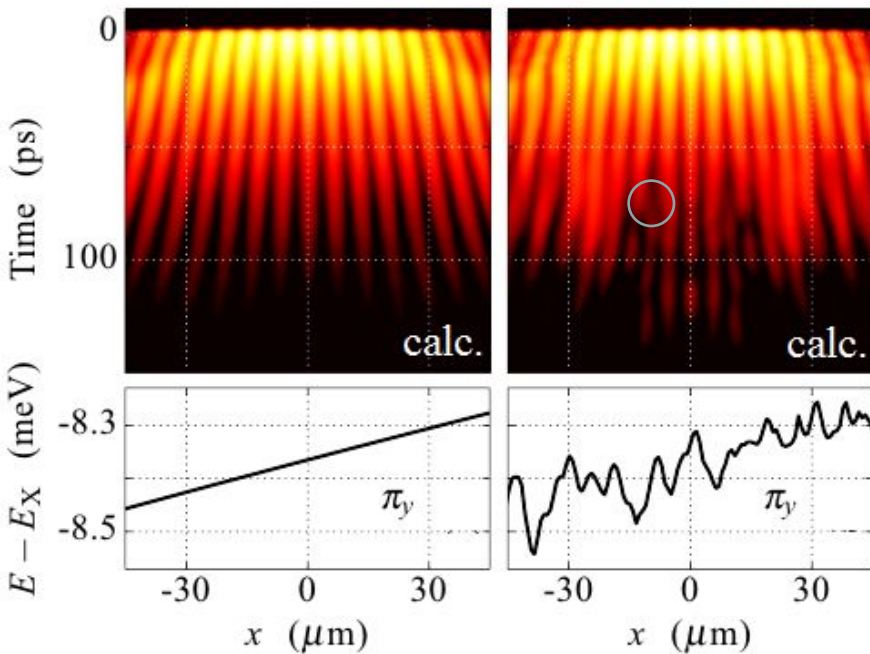
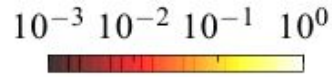
$$+ V \begin{pmatrix} \Psi_+^* \Psi_+ & 0 \\ 0 & \Psi_-^* \Psi_- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_+ \\ \Psi_- \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathcal{E}_+ \\ \mathcal{E}_- \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{k}_p \mathbf{r} - E_p t / \hbar)}$$

Параметры эксперимента +

$$dE_{LP} / dx = 2 \text{ мЭВ/мм} ; \delta E_{LP} = 100 \text{ мкЭВ}$$



$P = 0.12 \text{ nJ/pulse}$



При $t > 60 \text{ пс}$, когда $\alpha n_{LP} \sim \delta E_{LP}$: могут возникать сильные локальные флуктуации фазы ВФ конденсата. Данные возмущения влияют на когерентность свободно затухающего конденсата.

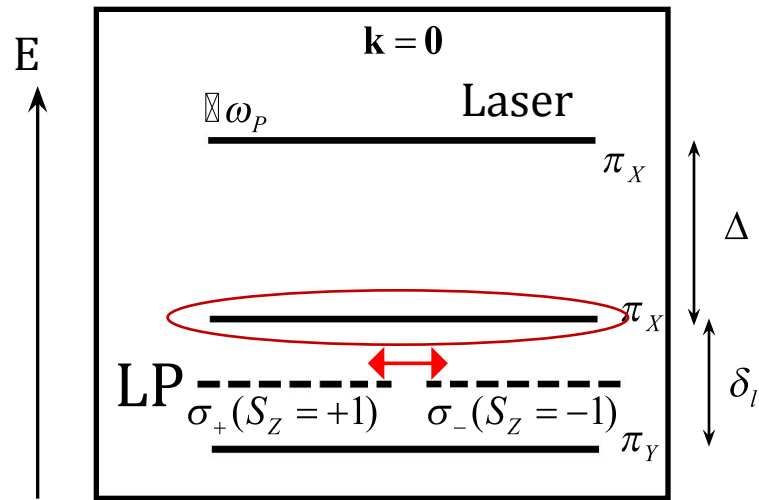
При резонансном возбуждении нижнего отщепленного линейного подуровня:

- конденсат НП в $k=0$ сохраняет поляризацию накачки во всей области времен наблюдения.
- конденсат наследует когерентность лазерного импульса в широком диапазоне плотностей возбуждения и сохраняет ее в течение десятков пикосекунд.

Основной причиной нарушения когерентности поляритонного конденсата при нерезонансном возбуждении является его взаимодействие с плотным экситонным резервуаром.

- В свободно затухающем поляритонном конденсате, при плотностях поляритонов, обеспечивающих фиолетовый сдвиг НП меньше амплитуды случайного потенциала могут возникать сильные локальные флуктуации фазы ВФ конденсата. Как показывают расчеты, данные локальные возмущения могут влиять на корреляционные свойства свободно затухающего конденсата.

Лазерная накачка в верхний отщепленный подуровень π_x



После развития поляризационной неустойчивости ($t \sim 15$ пс) поляритонный конденсат переходит в режим поляризационных биений, иногда называемых в литературе "внутренними джозефсоновскими осцилляциями" поляритонов [1].

При $t > 50$ пс период осцилляций:

$$T = 47 \pm 2 \text{ пс}$$

что соответствует периоду биений в невозмущенной системе подуровней π_x и π_y

$$T = \frac{\hbar}{\delta_l}$$

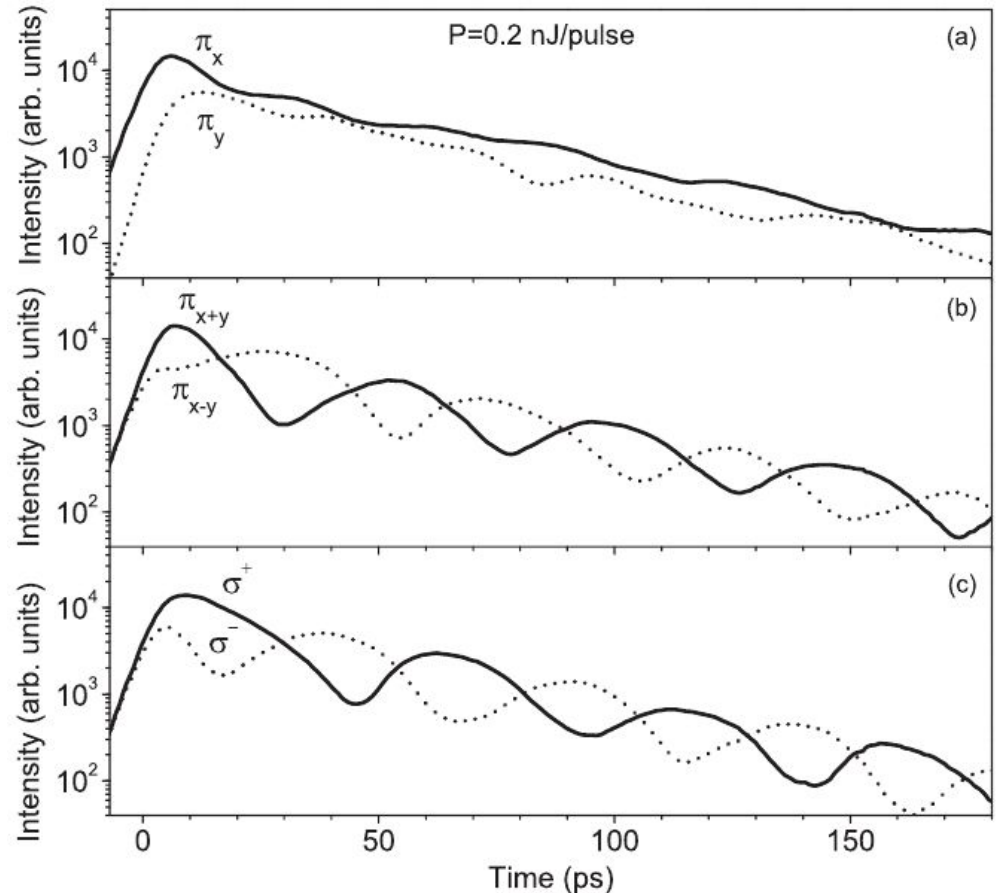
$$\gamma_{LP} = 70 \text{ мкэВ}$$

$$\delta_l \approx 110 \text{ мкэВ}$$

$$\Delta = 500 \text{ мкэВ}$$

$$\hbar \omega_p = E_{LP}^X + \Delta = 1618 \text{ мэВ}$$

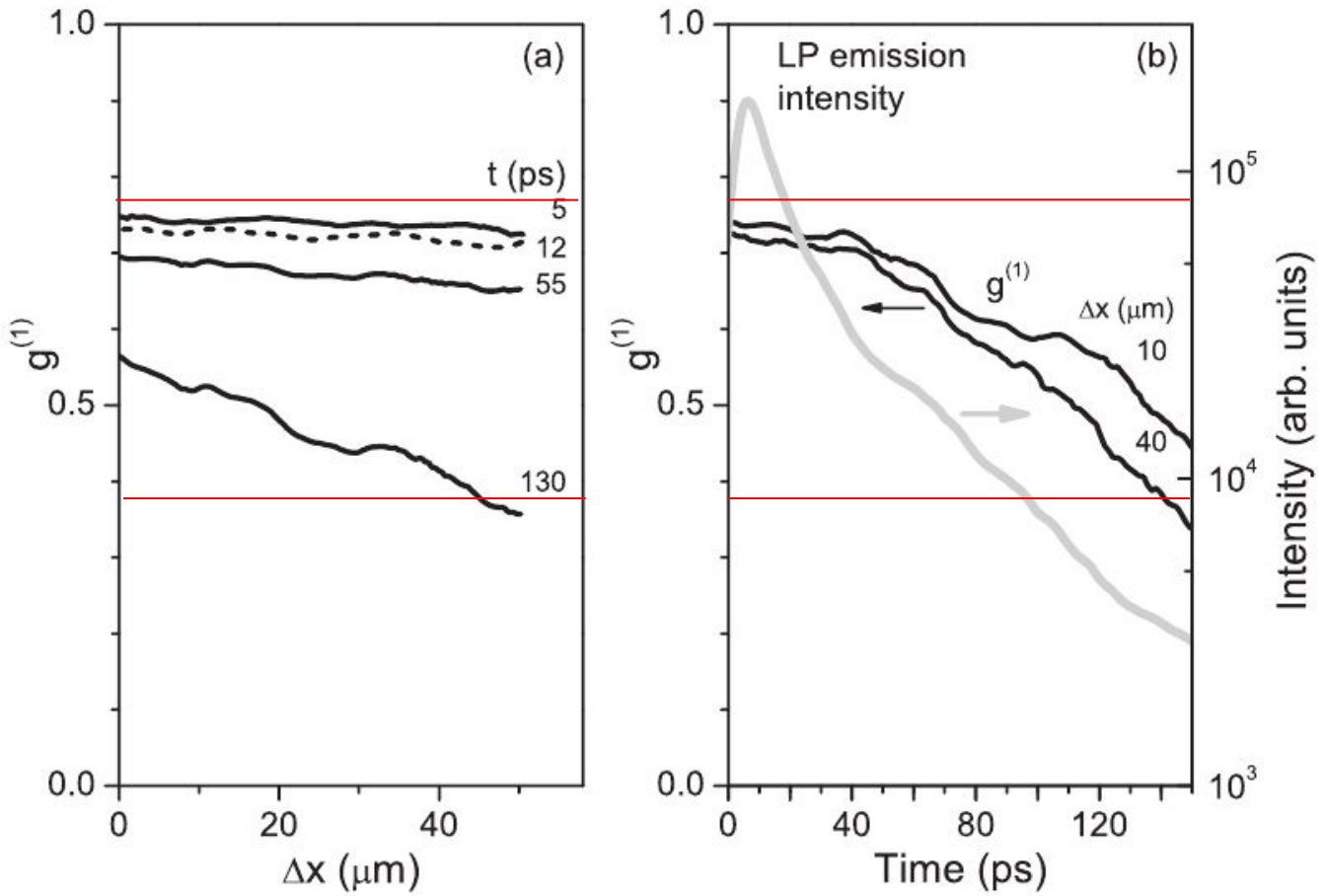
$$\Gamma_{las} = 1200 \text{ мкэВ}$$



[1] I. V. Shelykh, Phys. Rev. B **78**, 041302 (2008).

Когерентность в конденсате НП. π_x -накачка

$P = 0.5 \text{ nJ/pulse}$



Свободно затухающий спинорный конденсат НП наследует и сохраняет высокую пространственная когерентность в течение десятков пикосекунд.

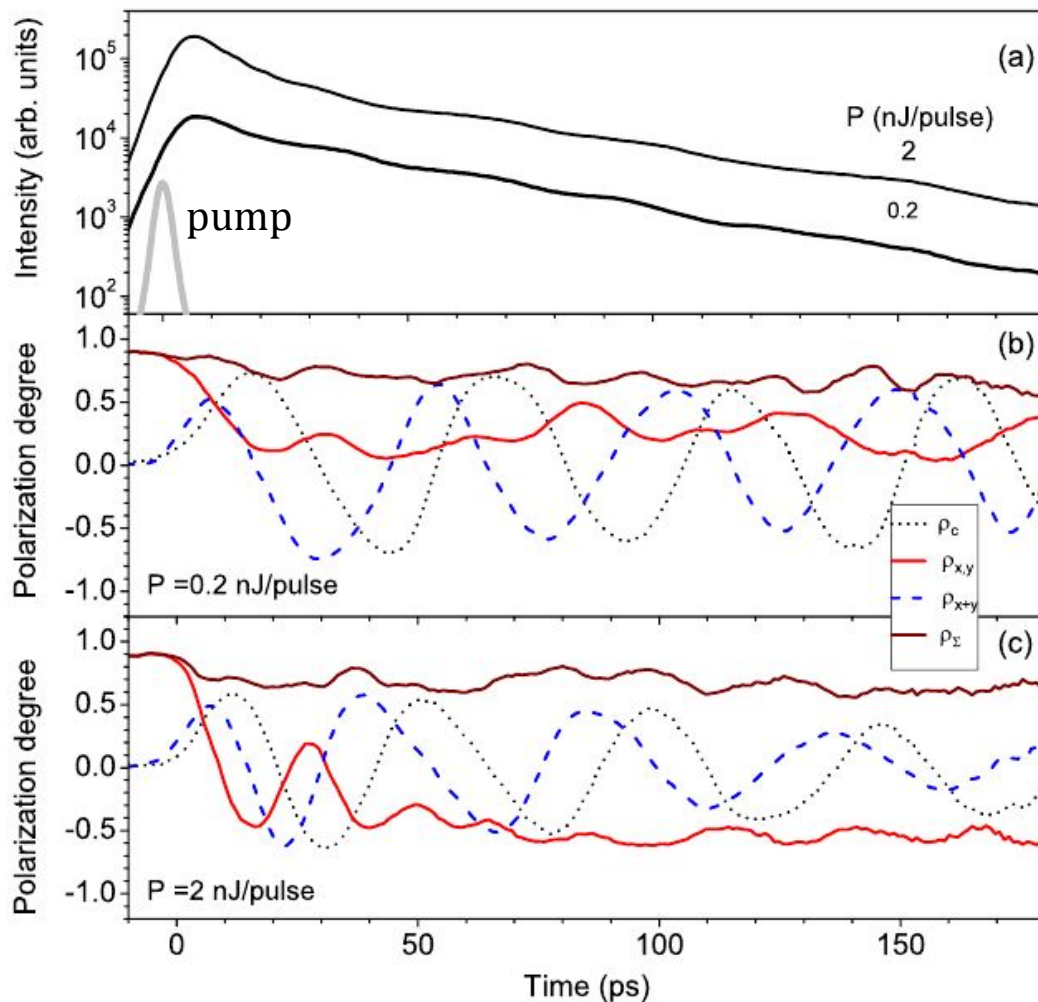
Поляризационные биения. π_x -накачка

$$\rho_C(t) = \frac{I(\sigma^+, t) - I(\sigma^-, t)}{I(\sigma^+, t) + I(\sigma^-, t)}$$

$$\rho_{X+Y}(t) = \frac{I(\pi_{X+Y}, t) - I(\pi_{X-Y}, t)}{I(\pi_{X+Y}, t) + I(\pi_{X-Y}, t)}$$

$$\rho_{XY}(t) = \frac{I(\pi_X, t) - I(\pi_Y, t)}{I(\pi_X, t) + I(\pi_Y, t)}$$

$$\rho_\Sigma = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_{XY}^2 + \rho_{X+Y}^2}$$



Медленная потеря когерентности и слабая деполяризация спинорного конденсата позволяют говорить о несущественности некогерентных процессов рассеяния - **одномодовая (0D) модель спинорного конденсата**

При $t > 50$ пс период осцилляций:
 $T = 47 \pm 2$ пс

Высокая лазерная накачка:

При $t < 50$ пс, когда плотность конденсата велика, период осцилляций меньше: 32 ± 2 пс, что свидетельствует о переходе в **нелинейный режим джозефсоновских осцилляций** из-за увеличения расщепления резонансных частот поляритонных состояний.

- На больших временах $\rho_{x,y}$ меняет знак. Смена знака свидетельствует о когерентном перераспределении поляритонов на нижний подуровень.

0D модель спинорного конденсата.

0D спинорная модель:

$$i d\psi_\sigma/dt = H_{\sigma,\sigma'} \psi_{\sigma'}, \quad \sigma = s_1, s_2$$

$$H_{\sigma,\sigma'} = H_{0,\sigma,\sigma'} + (\alpha_1 |\psi_\sigma|^2 + \alpha_2 |\psi_{-\sigma}|^2) \delta_{\sigma,\sigma'}$$

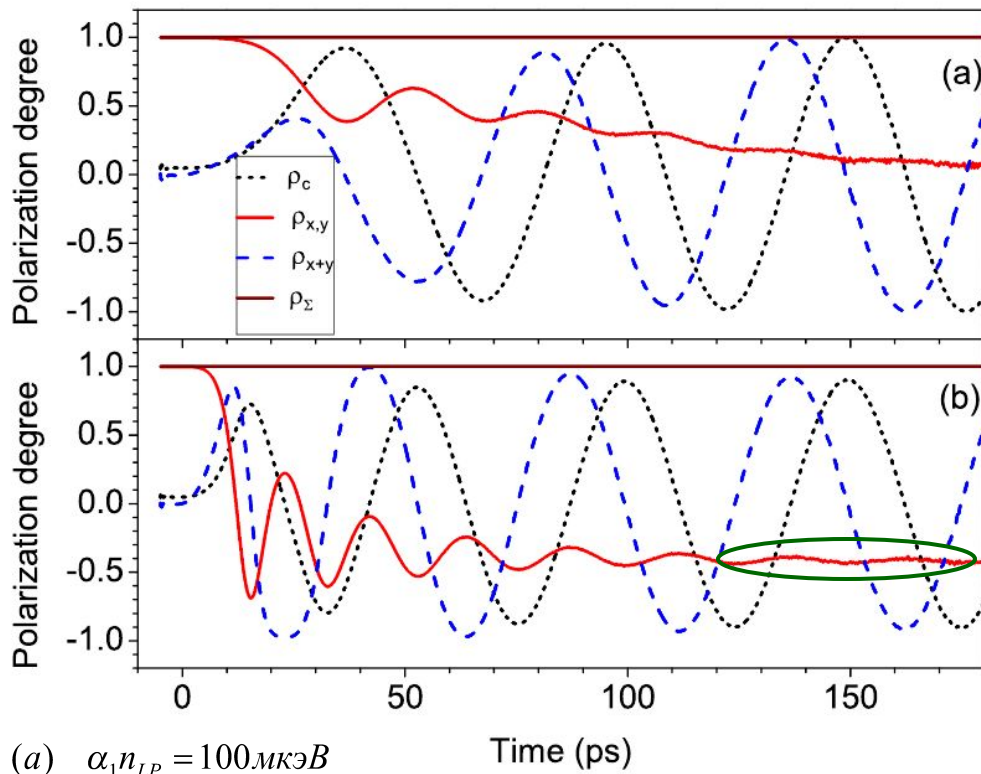
Вращение псевдоспина на сфере Блоха в эффективном магнитном поле:

$$\hbar \frac{d\mathbf{S}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{S}.$$

$$\boldsymbol{\Omega} = [\delta_l, 0, \delta_c + 2(\alpha_1 - \alpha_2)S_z]$$

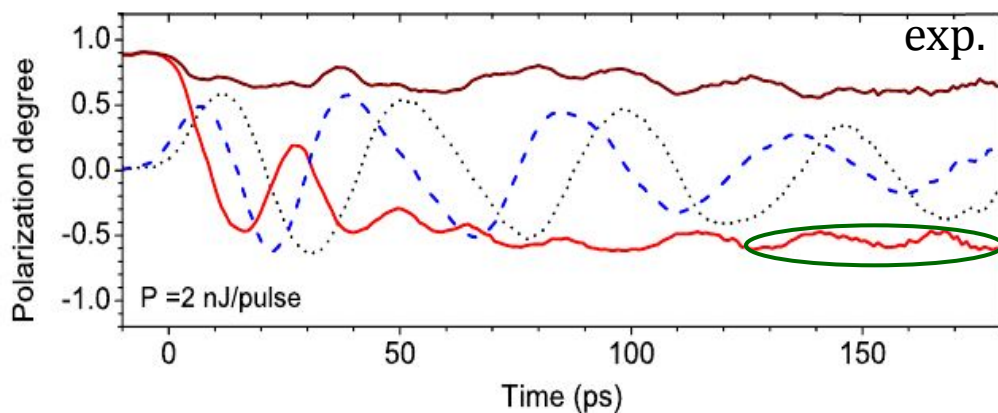
Уравнения описывают:

- 1 - поляризационную неустойчивость конденсата, сопровождающуюся осцилляциями ρ_{x+y} и ρ_c
- 2 - соответствие периода осцилляций ρ_{x+y} и ρ_c в конденсате низкой плотности расщеплению линейных подуровней и уменьшению периода при малых t из-за перенормировки частот поляритонов в плотном конденсате
- 3 - смену знака $\rho_{x,y}$ при больших t , являющуюся свидетельством когерентного перераспределения поляритонов на нижний подуровень.



(a) $\alpha_1 n_{LP} = 100 \text{ мкЭВ}$

(b) $\alpha_1 n_{LP} = 400 \text{ мкЭВ}$



Когерентное перераспределение поляритонов на нижний подуровень

Химпотенциал в поляритонной системе:

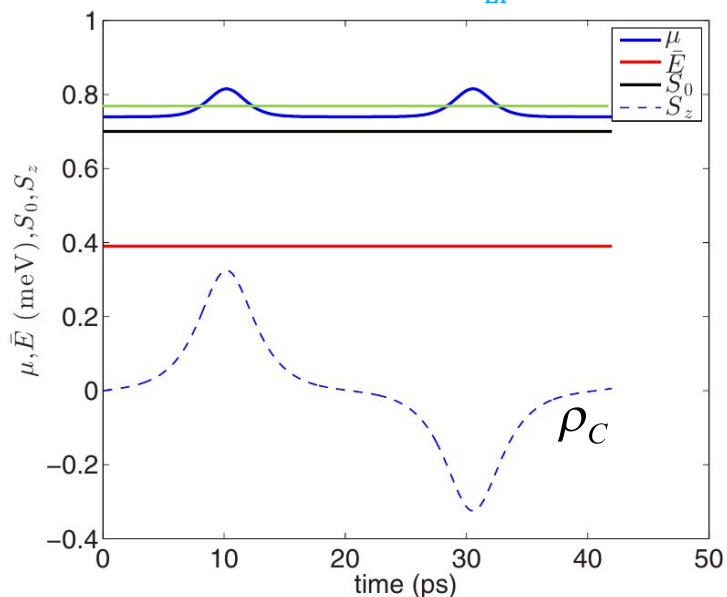
$$\mu = H_{\sigma,\sigma}^0/2 + (\alpha_1 + \alpha_2)S_0 + \frac{1}{2}(\delta_l\rho_l + \delta_c\rho_c) + (\alpha_1 - \alpha_2)\rho_c^2 S_0$$

$$\mu = dE_z/dn$$

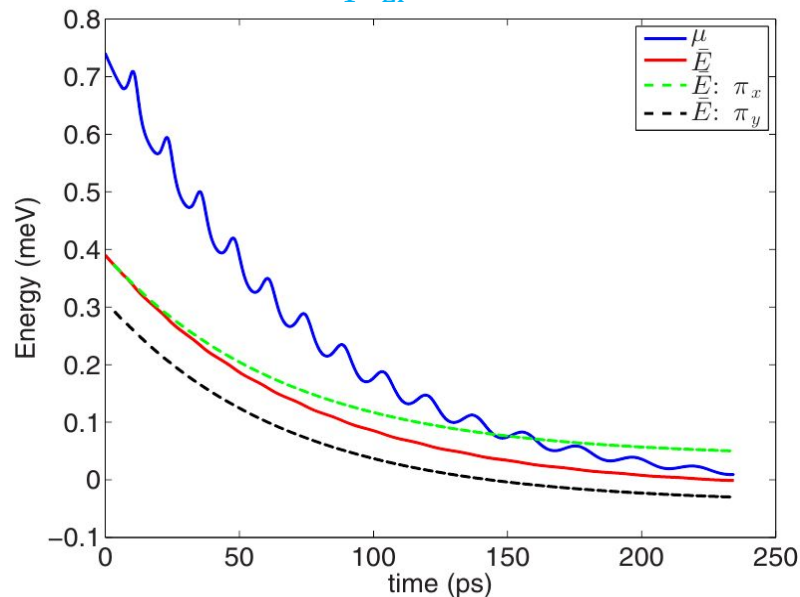
$$\bar{E} = E_z/2S_0; n_{LP} = 2S_0$$

$$\langle \mu \rangle_T = \mu(t=0) + (\alpha_1 - \alpha_2) * \langle \rho_c^2 \rangle * S_0$$

Без затухания: $n_{LP} = \text{const}$



С затуханием: $\tau_{LP} = 20$ пс
 $\alpha_1 n_{LP} = 400$ мкэВ



неравенство α_1 и α_2 ведет к зависимости химпотенциала конденсата от степени циркулярной поляризации (ρ_c) даже при постоянной плотности: μ минимален при линейной поляризации конденсата и растет с ростом ρ_c .

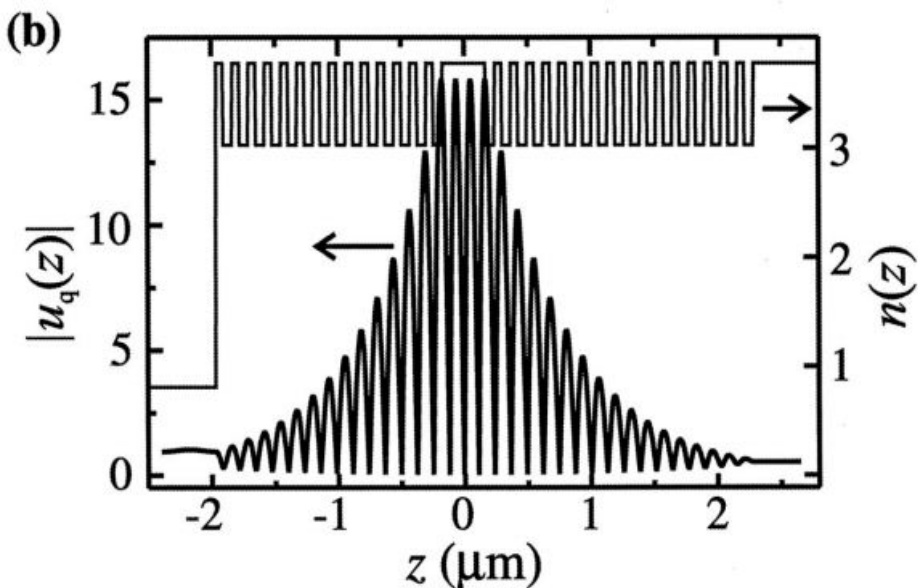
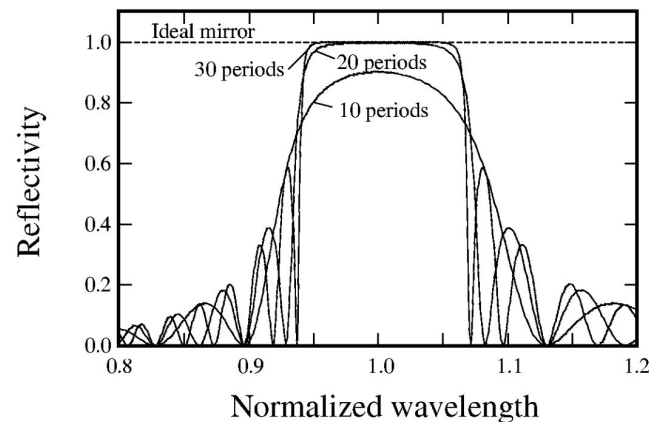
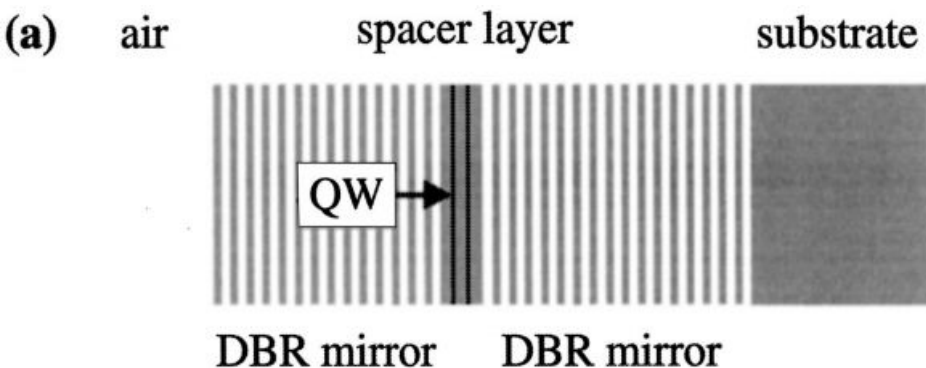
В затухающем конденсате дефицит энергии, возникающий при исчезновении из конденсата частицы с эллиптической поляризацией, компенсируется заменой части компоненты с верхнего подуровня компонентой с нижнего подуровня с сохранением когерентности конденсата.

При резонансном возбуждении верхнего отщепленного линейного подуровня:

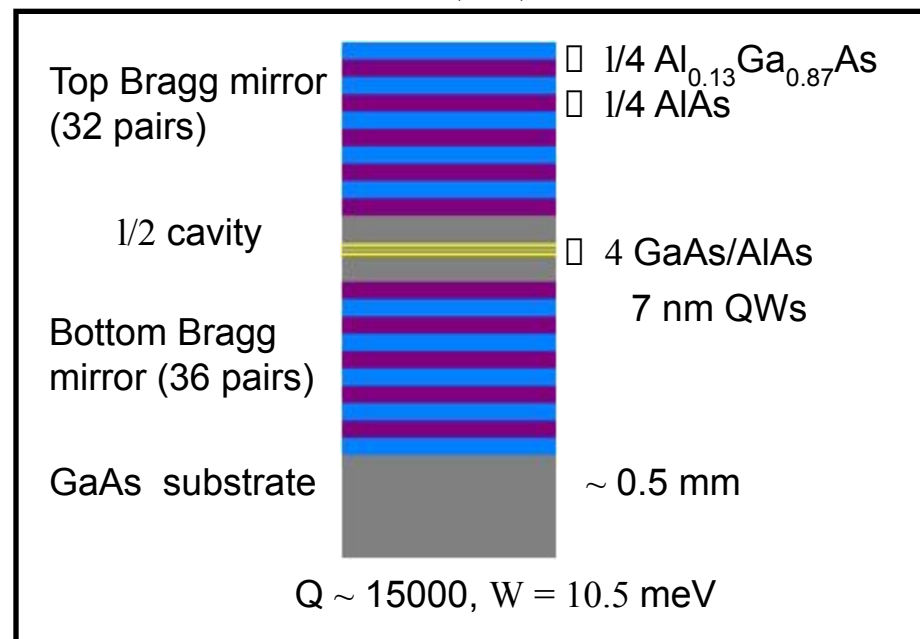
- конденсат **наследует и сохраняет** в течение десятков пикосекунд когерентность лазерного импульса в широком диапазоне плотностей возбуждения.
- конденсат **теряет устойчивость** при плотностях выше некоторого порогового значения: он переходит в **режим внутренних джозефсоновских колебаний** с сильно осциллирующими циркулярной и диагональной линейной степенями поляризации. Причина: **спиновая анизотропия поляритон-поляритонного взаимодействия.**
- наблюдается когерентное перераспределение поляритонов на нижний подуровень. Причина: **спиновая анизотропия поляритон-поляритонного взаимодействия.**
- при больших плотностях конденсата поляритон-поляритонное взаимодействие приводит к **“нелинейному” эффекту Джозефсона.**
- эффекты хорошо описываются в рамках спинорных уравнений Гросса–Питаевского.

Спасибо за внимание!

Схема полупроводникового микрорезонатора



$$R_{\max} = 1 - 4 \frac{n_{\text{ext}}}{n_c} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{2N} \quad (R_{\max} > 0.999)$$



A.V. Kavokin et al., Microcavities (Oxford University press, New York, 2007)

V. Timofeev et al., Exciton Polaritons in Microcavities (Springer-Verlag, Berlin, 2012)