

Московский физико-технический институт
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (отделение физики
твёрдого тела, лаборатория физики неоднородных систем)

Нелинейная динамика излучения GaAs- микрорезонатора со встроенными квантовыми ямами

Только родился — и вот его нет,
Шлет он прощальным фотоном привет.
Ты не смотри на него свысока,
Пикосекунда — так жизнь коротка!
(поляритон в Бозе-конденсате)

Автор: Мыльников Д.А., студент 4 курса

Научный руководитель: Белых В.В., к.ф.-м.н.

Микрорезонатор



Коэффициент отражения зеркал:

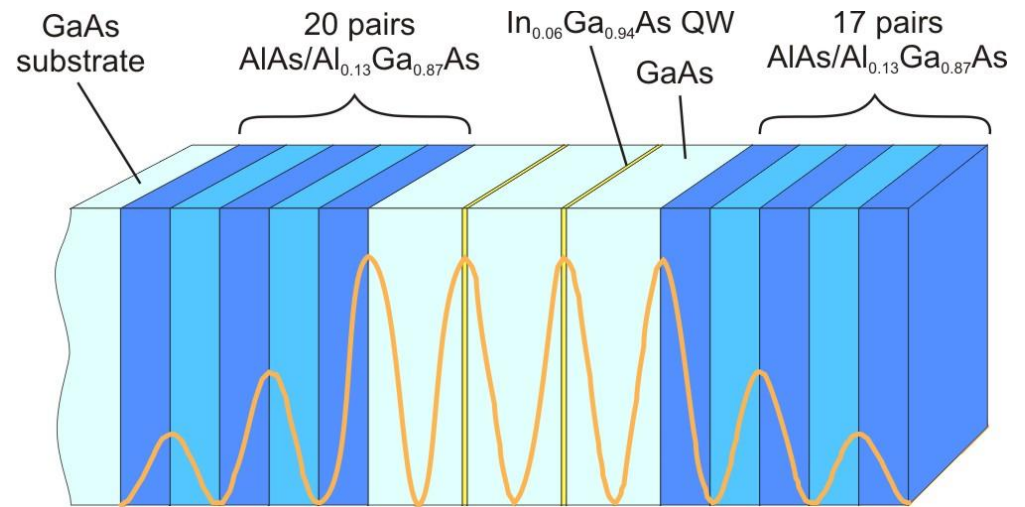
$$R = \left| \frac{\left(\frac{n_b}{n_a}\right)^{2N} - \frac{n_f}{n_0}}{\left(\frac{n_b}{n_a}\right)^{2N} + \frac{n_f}{n_0}} \right|^2 \approx 0.998$$

Полоса отражения зеркал:

$$\Delta = \frac{8c}{\lambda} \cdot \frac{n_b - n_a}{n_b + n_a} \approx 100 \text{ nm}$$

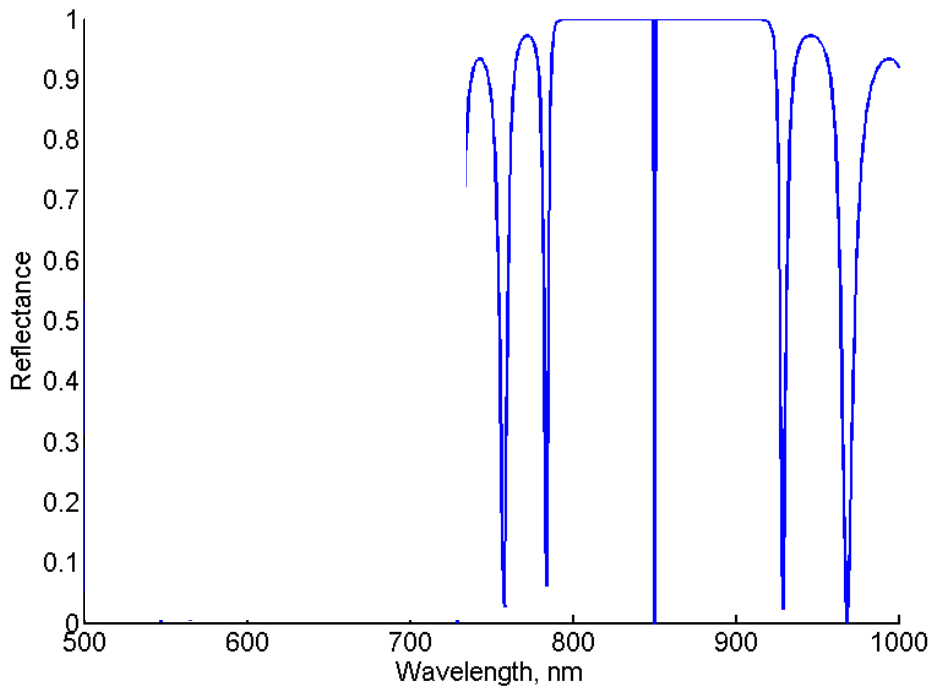
Добротность:

$$Q = 2000 - 7500$$

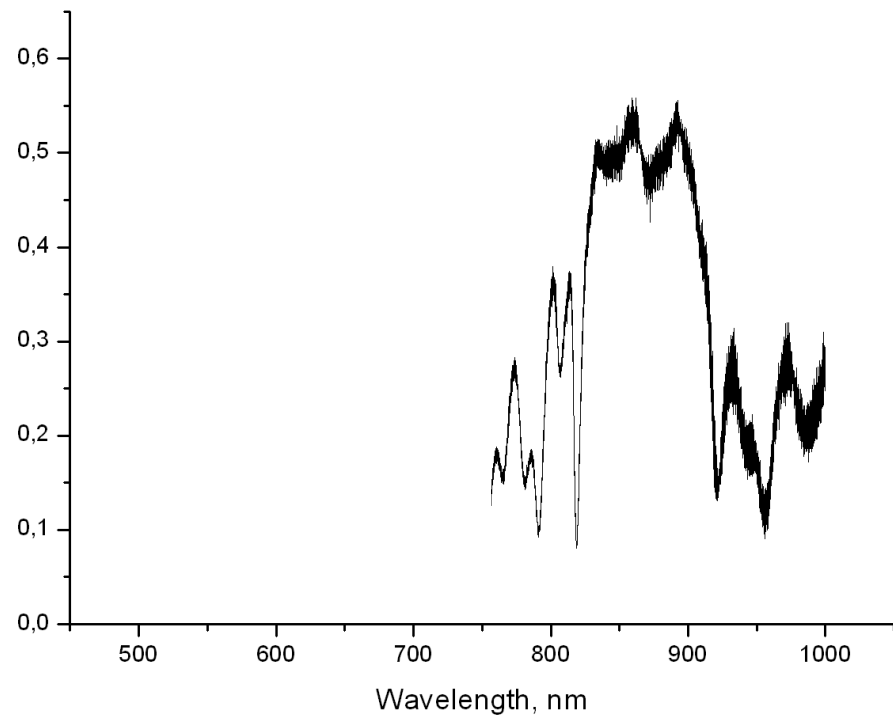


$$\lambda = 850 \text{ nm}, L = \frac{3}{2} \lambda, 3 \times 2 \text{ QWs}$$

Спектр отражения МР



Моделирование



Измерения



Поляритоны. Квантовый подход

Гамильтониан

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k}} E_{ex}(k) \hat{b}_{\mathbf{k}}^+ \hat{b}_{\mathbf{k}} + \sum_{\mathbf{k}} E_{ph}(k) \hat{a}_{\mathbf{k}}^+ \hat{a}_{\mathbf{k}} + \frac{\Omega_R}{2} \sum_{\mathbf{k}} \hat{b}_{\mathbf{k}}^+ \hat{a}_{\mathbf{k}} + \frac{\Omega_R}{2} \sum_{\mathbf{k}} \hat{a}_{\mathbf{k}}^+ \hat{b}_{\mathbf{k}}$$

линейным преобразованием

$$\begin{cases} \hat{p}_{\mathbf{k}}^U = X_k^U \hat{b}_{\mathbf{k}} + C_k^U \hat{a}_{\mathbf{k}} \\ \hat{p}_{\mathbf{k}}^L = X_k^L \hat{b}_{\mathbf{k}} + C_k^L \hat{a}_{\mathbf{k}} \end{cases}$$

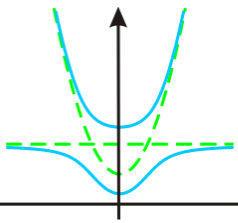
приводится к диагональному виду:

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k}} E_U(k) \hat{p}_{\mathbf{k}}^{U+} \hat{p}_{\mathbf{k}}^U + \sum_{\mathbf{k}} E_L(k) \hat{p}_{\mathbf{k}}^{L+} \hat{p}_{\mathbf{k}}^L$$

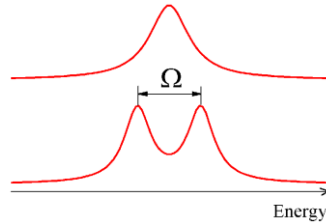
Собственные значения:

$$E_{U,L}(k) = \frac{1}{2} (E_{ex}(k) + E_{ph}(k)) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(E_{ph}(k) - E_{ex}(k))^2 + \Omega_R^2}$$

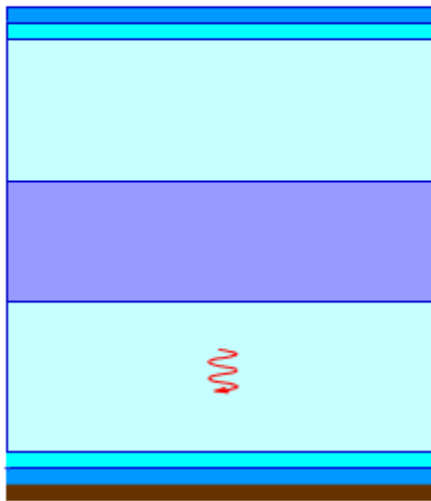
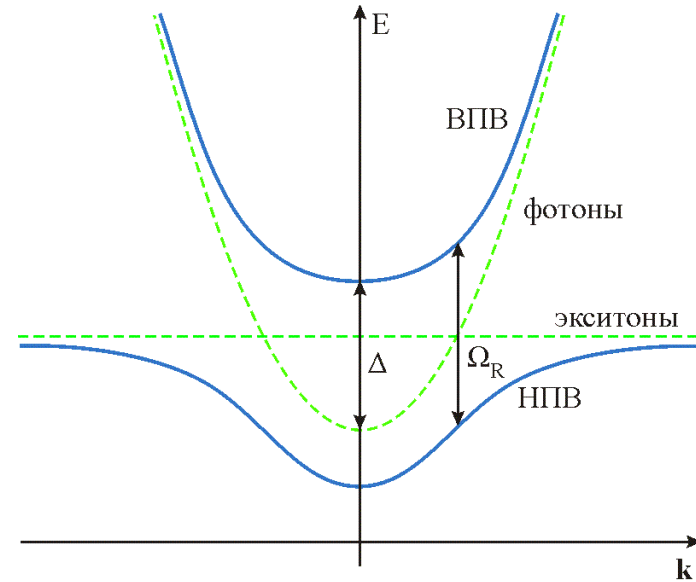
Режимы сильной и слабой связи



Слабая связь: $\Omega_R < \gamma_{ex} + \gamma_{ph}$



Сильная связь: $\Omega_R > \gamma_{ex} + \gamma_{ph}$



MP в режиме сильной связи

Фотонная мода

$$E_{ph} = \hbar \omega = \hbar \frac{c}{n} \cdot \sqrt{k_{\perp}^2 + k_P^2} \approx E_{ph}^0 + \frac{\hbar^2}{2m_{ph}} \cdot k_P^2$$

Поляритонные моды

$$E_{U,L}(k) = \frac{1}{2} (E_{ex}(k) + E_{ph}(k)) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(E_{ph}(k) - E_{ex}(k))^2 + \Omega_R^2}$$



История и перспективы

История:

1946 — влияние резонатора на вероятность спонтанного излучения атома (Purcell)

1963 — наблюдение 3D экситонных поляритонов в CdS (Thomas, Hopfield)

1992 — наблюдение режима сильной связи 2D экситонов и фотонов в микрорезонаторе со встроенными КЯ (Weisbuch)

2006 — Бозе-конденсация поляритонов в CdTe микрорезонаторе:
J. Kasprzak et al., *Nature* **443**, 409 (2006)

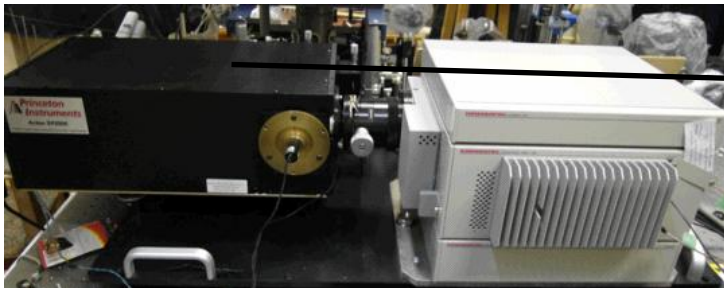
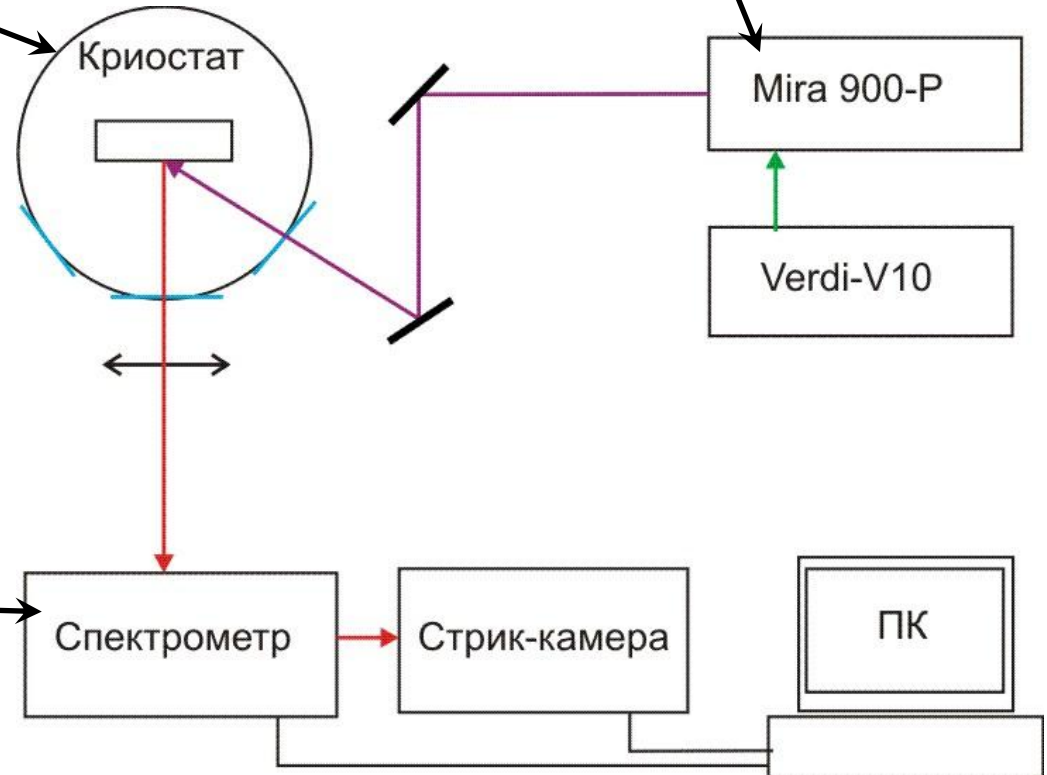
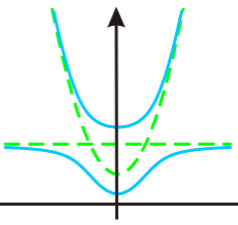
2008 — квантованные вихри:
K. G. Lagoudakis et al., *Nature Physics* **4**, 706 (2008)

2009 — сверхтекучесть поляритонов:
A. Amo et al., *Nature Physics* **5**, 805 (2009)

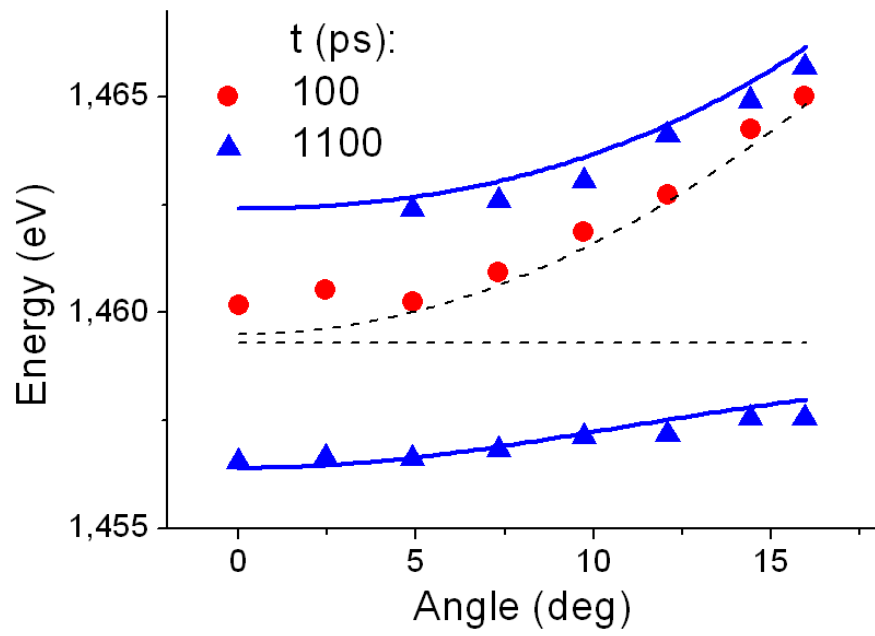
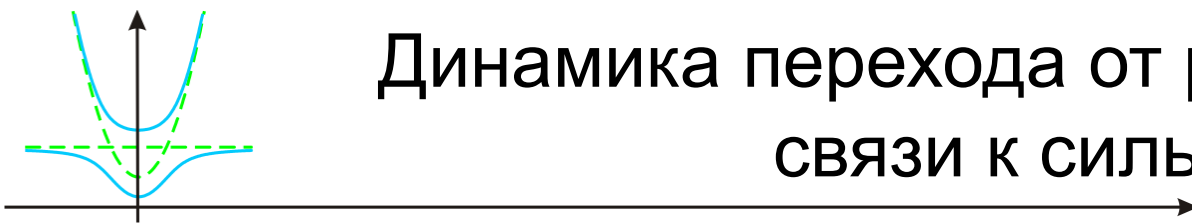
Перспективы применения:

- поляритонные лазеры — лазеры без инверсной населенности
- микрорезонаторные светодиоды
- элементы оптоэлектронных устройств — вычислительных устройств нового поколения

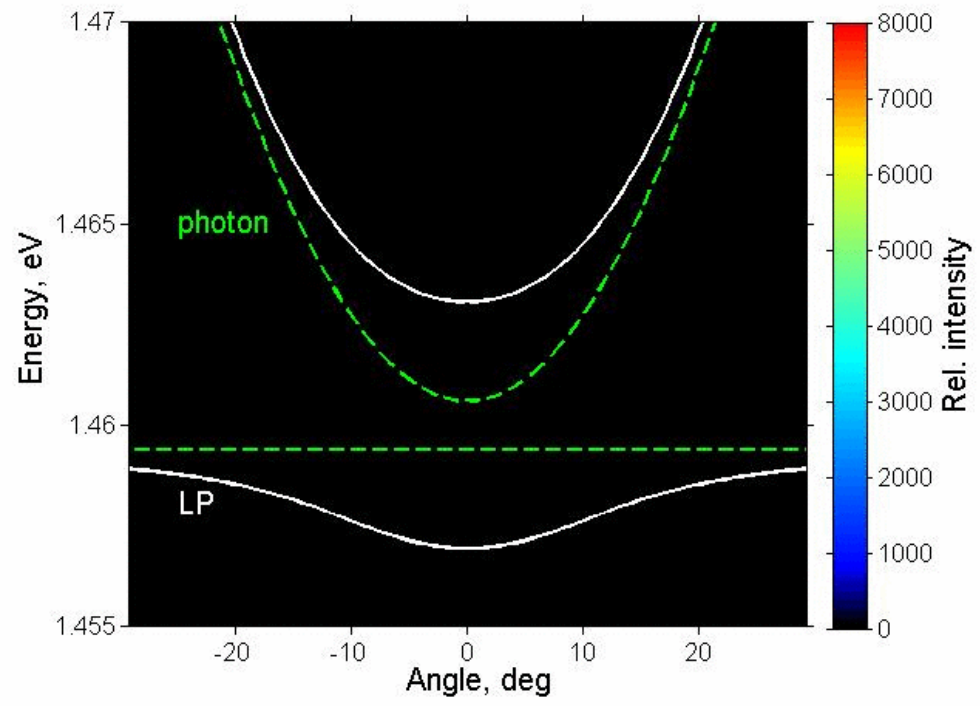
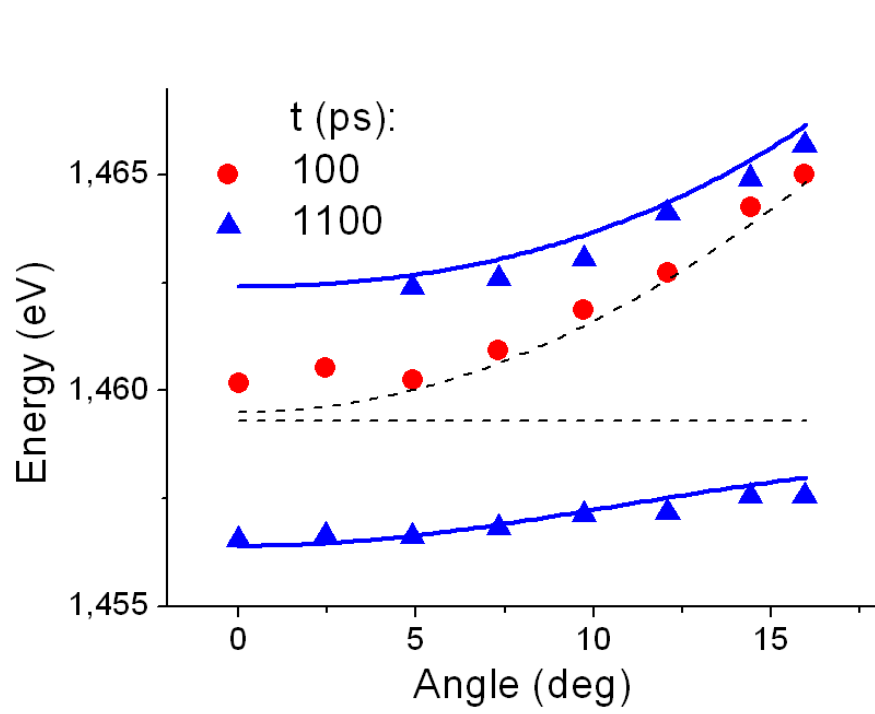
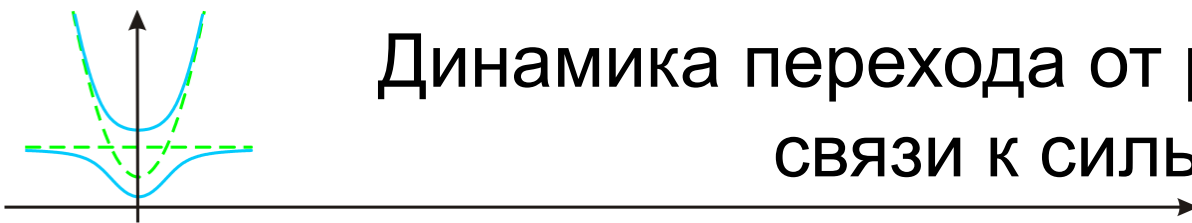
Экспериментальная установка



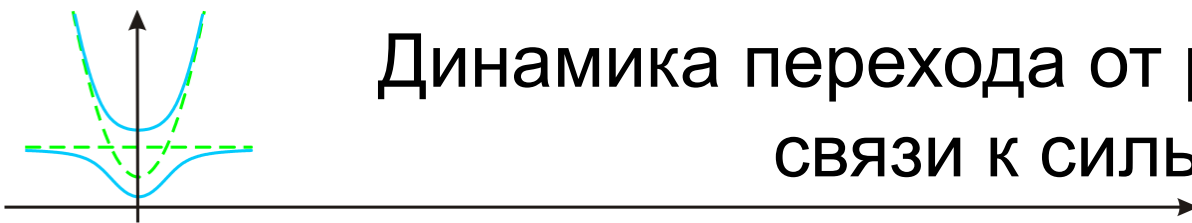
Динамика перехода от режима слабой связи к сильной



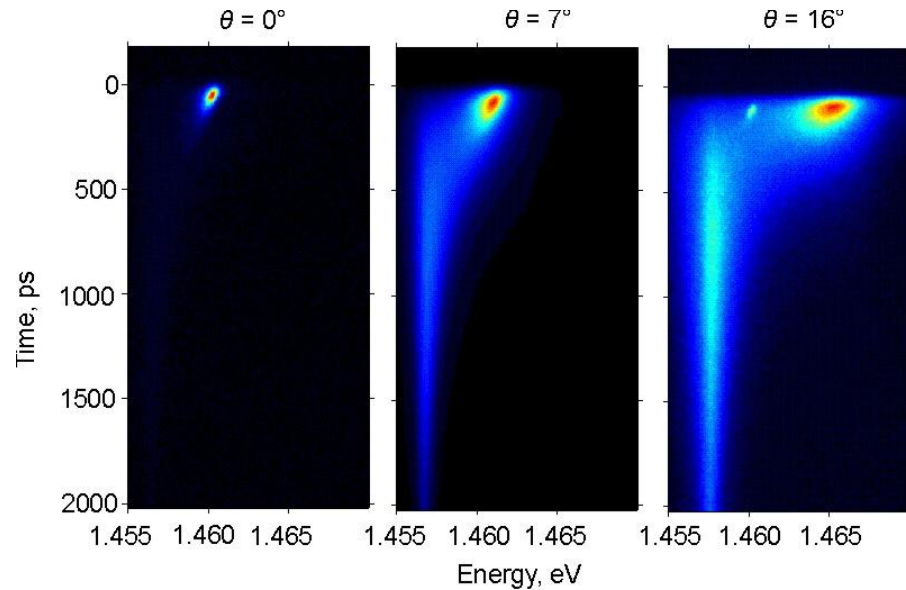
Динамика перехода от режима слабой связи к сильной



Динамика перехода от режима слабой связи к сильной



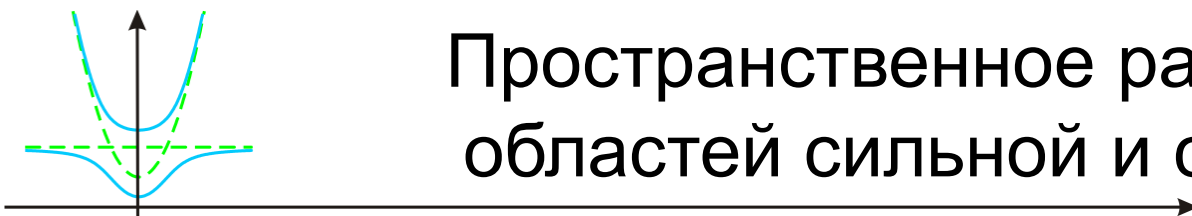
В режиме слабой связи наблюдается линия с энергией НПВ



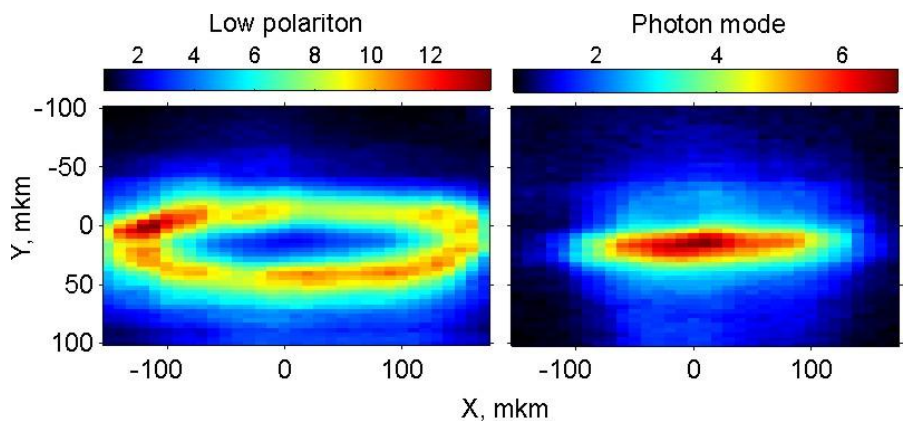
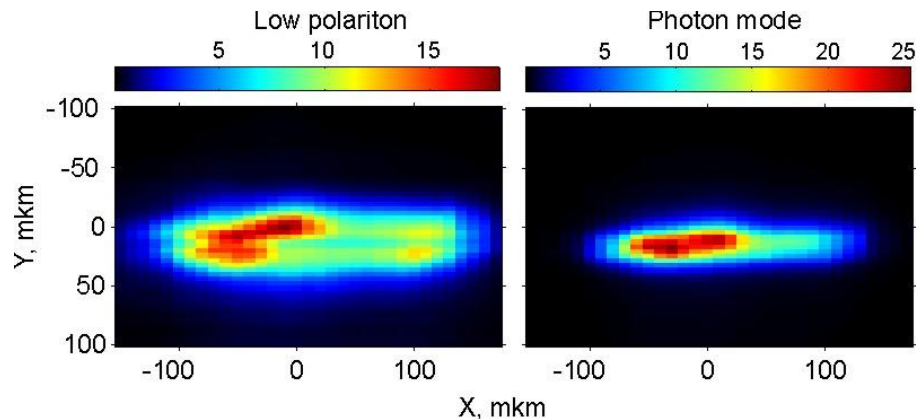
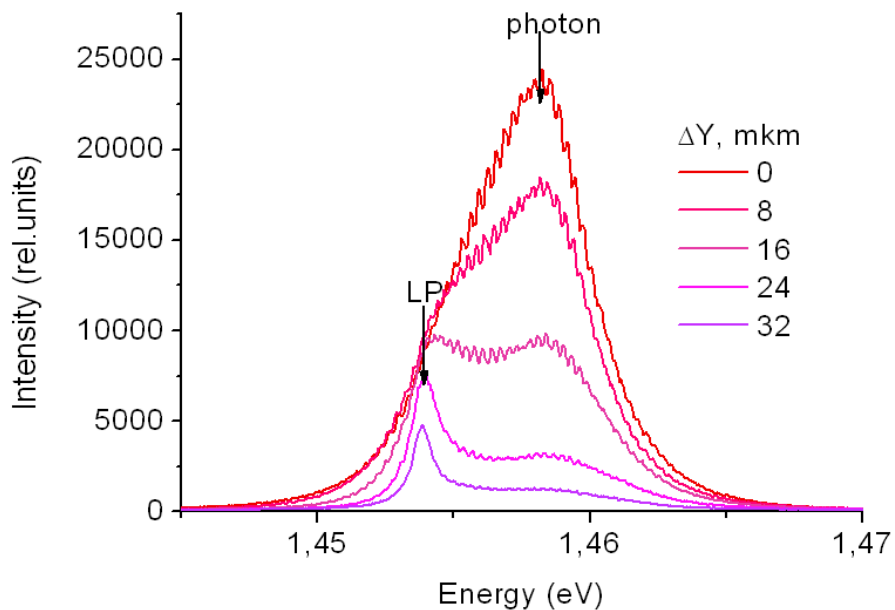
Гипотезы:

- Излучение с краев пятна
- Неоднородности потенциала
- Такова природа слабого режима

Пространственное распределение областей сильной и слабой связи



Spectra at different distances from the center of the spot



- Излучение с краев пятна — мало
- Неоднородности потенциала — малы
- Такова природа слабого режима — да

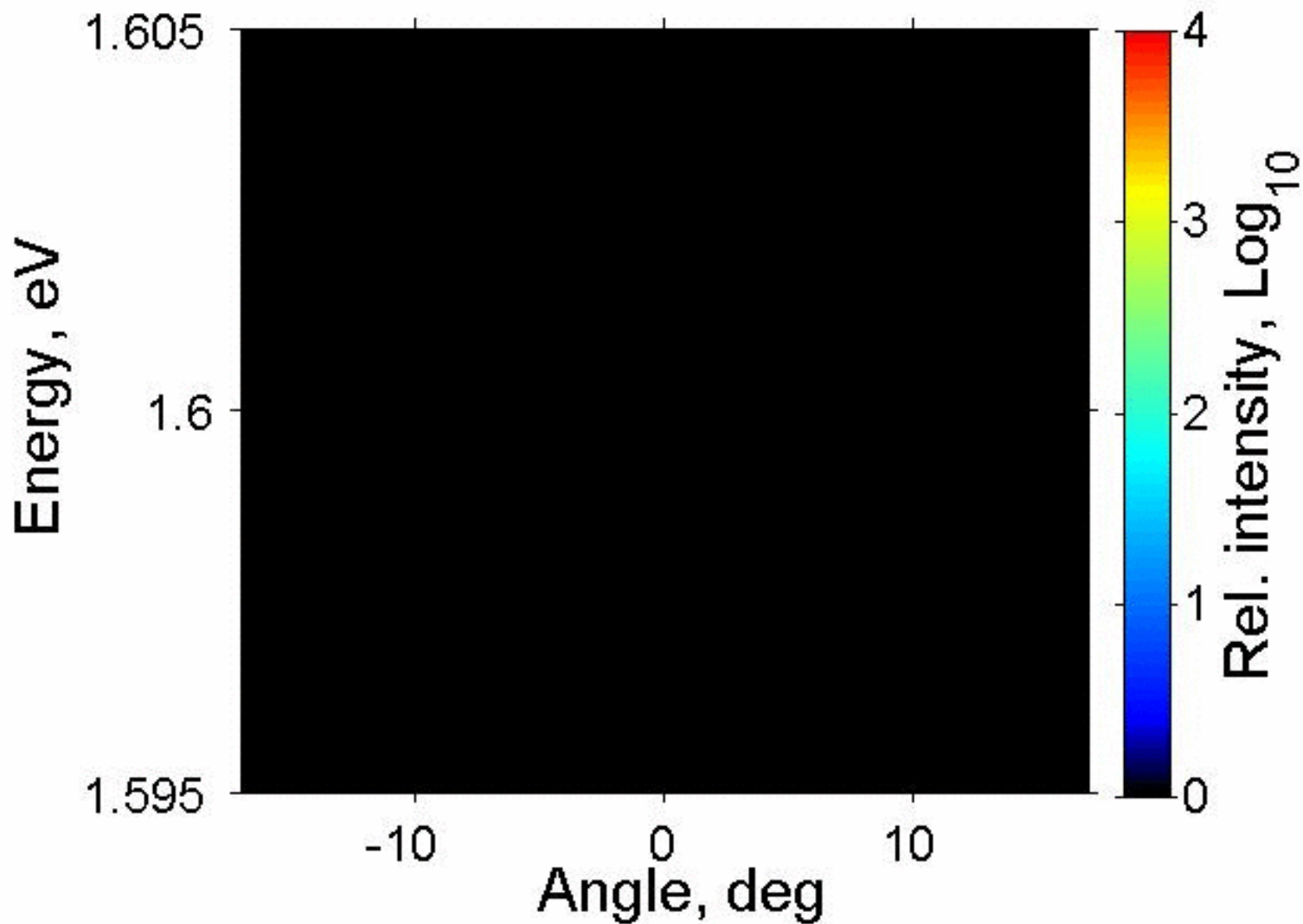
Бозе-конденсация



Бозе-конденсация



$t = 0$ ps



Выводы



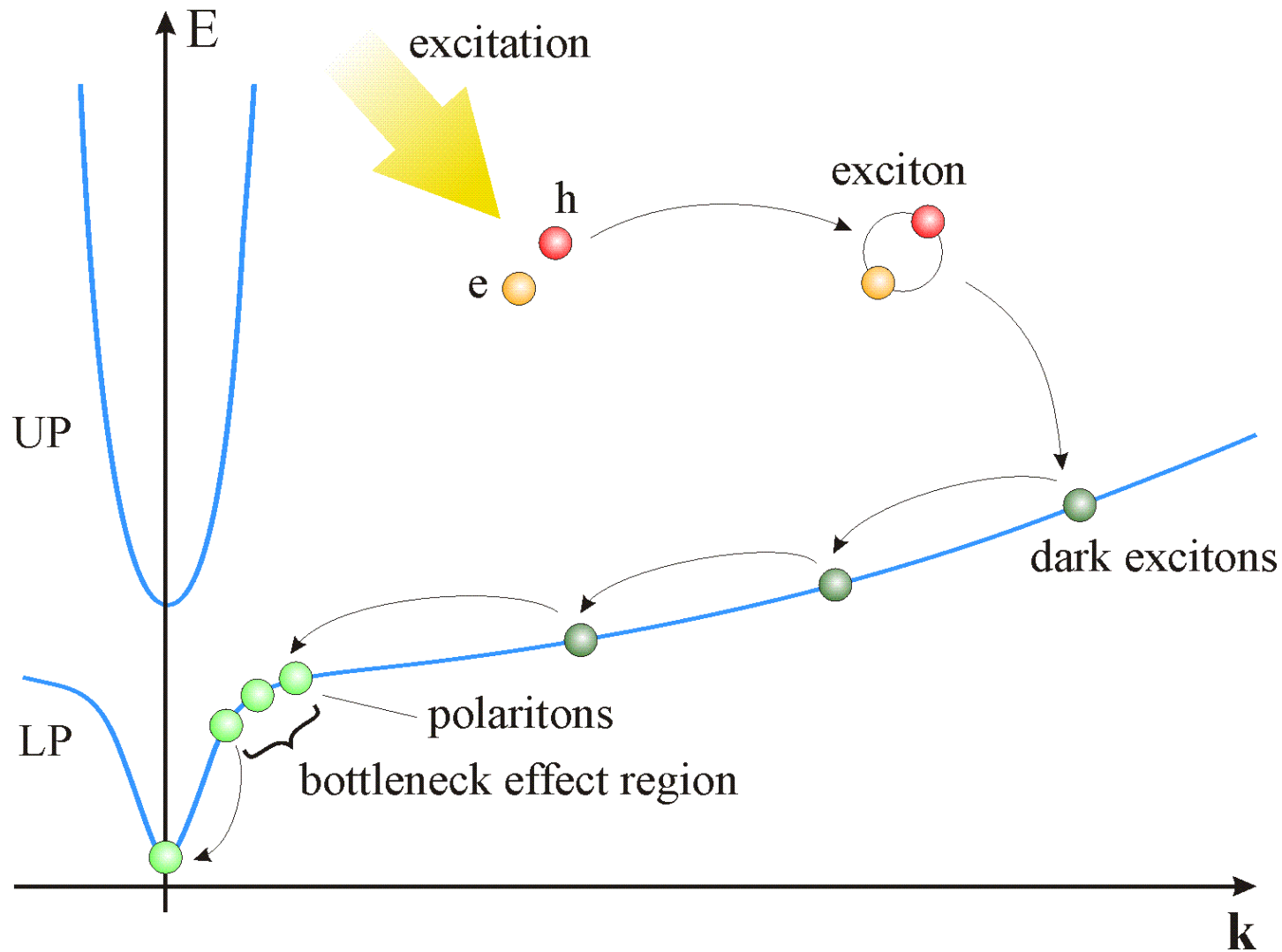
1. Проведено математическое моделирование свойств МР
2. Изучена динамика перехода МР от режима слабой связи к сильной
3. Изучено пространственное распределение областей сильной и слабой связи
4. Получена Бозе-конденсация поляритонов

Публикации



1. V.V. Belykh, D.A. Mylnikov, N.N. Sibeldin. Dynamics of the transition from weak to strong exciton-photon coupling regime in a GaAs microcavity: angle resolved measurements. Phys. Status Solidi C to be published.
2. V.V. Belykh, D.A. Mylnikov, N.N. Sibeldin. Dynamics of the transition from weak to strong exciton-photon coupling regime in a GaAs microcavity: angle resolved measurements. Abstracts of 11th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Berlin, Germany, April 4-8, 2011, p. 197 (2011).

Релаксация поляритонов



Стрик-камера

