

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

Кавокин Алексей Витальевич

**ФИЗИКА ПОЛЯРИТОННЫХ ЛАЗЕРОВ**

Научная специальность  
1.3.8. Физика конденсированного состояния

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2022

## Введение

**Поляритонный лазер** – это излучатель когерентного света, основанный на Бозе-Эйнштейновском конденсате свето-материальных квазичастиц: экситонных поляритонов [A1]. Бозонные конденсаты экситонных поляритонов обладают рядом уникальных физических свойств, благодаря которым физика поляритонных лазеров богата яркими экспериментально наблюдаемыми эффектами. В настоящей работе построена теория поляритонных лазеров, охватывающая их оптические, спиновые, статистические и другие свойства. Предсказан ряд эффектов, многие из которых были впоследствии обнаружены экспериментально.

Экситонный поляритон – это квазичастица, сформированная в режиме сильной связи между фотонной модой и экситонным резонансом в полупроводниковой структуре. Волновая функция экситонного поляритона – это суперпозиция экситонной и фотонной компоненты [A2]. Экситонный поляритон (поляритон) является композитным бозоном. Бозе-Эйнштейновская конденсация и сверхтекучесть поляритонов наблюдались экспериментально в обширном классе полупроводниковых структур и в широком температурном диапазоне, включающем в некоторых случаях и комнатную температуру [A3, A4].

Концепция поляритонного лазера была сформулирована в середине 1990-х годов, когда экспериментальное наблюдение режима сильной связи света и вещества в полупроводниковых микрорезонаторах открыло перспективу создания бозонных конденсатов свето-материальных квазичастиц: экситонных поляритонов [A5]. Поляритонный лазер основан на очевидном свойстве поляритонного конденсата: способности излучать свет. Свет выходит наружу, туннелируя через брэгговские зеркала, ограничивающие полупроводниковый микрорезонатор. Этот процесс является спонтанным, что составляет одно из главных отличий поляритонного лазера от обычного лазера, генерирующего свет благодаря стимулированному оптическому переходу. Поскольку спонтанное излучение света неизбежно в любой реалистичной структуре, содержащей экситонные поляритоны, достаточно создать Бозе-Эйнштейновский конденсат

поляритонов, чтобы возник поляритонный лазер. В силу законов сохранения энергии и волнового вектора, свет, излучаемый бозонным конденсатом, будет когерентным и монохроматическим. Его поляризация будет соответствовать поляризации конденсата [A6].

Важно подчеркнуть, что бозонный конденсат в поляритонном лазере, как правило, не находится в термодинамическом равновесии с кристаллической решеткой. Таким образом, конденсат может формироваться в любом квантовом состоянии, не обязательно в нижнем по энергии. Формирование конденсата начинается в том случае, когда скорость прихода поляритонов в определенное квантовое состояние становится выше скорости ухода частиц из этого состояния (за счет излучения света, рассеяния, Оже-рекомбинации и т.п.). Таким образом, пороговая накачка поляритонного лазера определяется кинетикой релаксации поляритонов в конденсат и их ухода из конденсата. Порог накачки в поляритонных лазерах может быть существенно ниже порога накачки в обычных полупроводниковых лазерах, который диктуется условием возникновения инверсной заселенности в электронной системе [A7]. В этом состоит второе качественное отличие поляритонных лазеров от обычных лазеров. Еще одно отличие связано с поляризационной степенью свободы. Обычные полупроводниковые лазеры, как правило, излучают линейно поляризованный свет. Ориентация плоскости его поляризации определяется поляризацией оптической моды, в которую происходит стимулированное излучение. В поляритонных лазерах, поляризация конденсата либо формируется спонтанно [A8], либо задается внешними условиями (анизотропией структуры, напряжением, приложенным электрическим или магнитным полем) [A9]. Поляритонный лазер позволяет управлять поляризацией излучения. Двухкомпонентная (спинорная) природа поляритонного конденсата играет важную роль в физических процессах, происходящих в поляритонных лазерах. Благодаря спинорному конденсату, в поляритонных лазерах наблюдаются спиновые эффекты Холла [A10] и Мейсснера [A11], предсказанные и подробно изученные в данной работе.

Таким образом, физика поляритонных лазеров существенно отличается от лазерной физики, созданной во второй половине XX века. Неравновесная природа и спиновые свойства поляритонных конденсатов, а также относительная простота их реализации в широком спектре полупроводниковых структур делают физику поляритонных лазеров самостоятельной, быстро развивающейся областью физики, включающей в себя элементы статистической физики, спинтроники, оптики полупроводников, физики многочастичных систем. В данной работе описаны основные особенности неравновесных поляритонных конденсатов, предсказан ряд уникальных эффектов, многие из которых уже обнаружены в поляритонных лазерах.

A1. Kavokin A.V., Liew T.C.H., Klemmt S., Schneider C., Lagoudakis P. and Hoefling S. Polaritonics for classical and quantum computing// Nature Reviews Physics. – 2022. – <https://doi.org/10.1038/s42254-022-00447-1>

A2. Kavokin A.V., Baumber J.J., Malpuech G. and Laussy F.P.// MICROCAVITIES, Second Edition. - Oxford Science Publications. 2017. Oxford. 624 с.

A3. Kasprzak, J. et al. Bose–Einstein condensation of exciton polaritons// Nature. - 2006. –Т. 443. – С. 409–414.

A4. Christopoulos S., von Högersthal G. Baldassarri, Grundy A. J., Lagoudakis P. G., Kavokin A. V., Baumber J. J., Christmann G., Butté R., Feltin E., Carlin J.-F., and Grandjean N. Room-Temperature Polariton Lasing in Semiconductor Microcavities// Phys. Rev. Lett. – 2007. Т. 98. – С. 126405.

A5. Imamoğlu A., Ram R. J., Pau S. & Yamamoto Y. Nonequilibrium condensates and lasers without inversion: exciton–polariton lasers// Phys. Rev. A. 1996. – Т. 53. – С. 4250–4253.

A6. Shelykh I.A., Rubo Y.G., Malpuech G., Solnyshkov D.D., Kavokin A.V. Polarization and propagation of polariton condensates// Phys.Rev. Lett. – 2006. – Т. 97. – С. 66402.

- A7. Bhattacharya P., Xiao B., Das A., Bhowmick S. and Heo J. Solid state electrically injected exciton–polariton laser// *Phys. Rev. Lett.* – 2013. T. 110. – C. 206403.
- A8. Baumberg J.J., Kavokin A.V., Christopoulos S., Grundy A.J.D., Butte R., Christmann G., Solnyshkov D.D., Malpuech G., von Hagersthal G.B.H., Feltn E., Carlin J.F., Grandjean N. Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser// *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – T.101, вып. 13. – C. 136409.
- A9. Kasprzak J., Andre Rю, Dang L.S., Shelykh I.A., Kavokin A.V., Rubo Y.G., Kavokin K.V., Malpuech G. Build up and pinning of linear polarization in the Bose condensates of exciton polaritons// *Phys. Rev. B.* – 2007. T. 75, вып. 4. – C. 45326.
- A10. Kavokin A.V., Malpuech G. and Glazov M. Optical spin Hall effect // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – T. 95. – C. 136601.
- A11. Krol M., Mirek R., Stephan D., Lekenta K., Rousset J.G., Pacuski W., Kavokin A.V., Matuszewski M., Szczytko J., Pietka B. Giant spin Meissner effect in a nonequilibrium exciton-polariton gas// *Phys. Rev. B.* – 2019. T. 99, вып. 11. – C. 115318.

## **Краткое описание полученных соискателем результатов**

### **1) Неравновесная Бозе-Эйнштейновская конденсация экситонных поляритонов при комнатной температуре.**

В работах [Б1, Б2] теоретически показано, что микрорезонаторы на основе широкозонных полупроводников ZnO и GaN являются подходящими системами для наблюдения Бозе-Эйнштейновской конденсации экситонных поляритонов при комнатной температуре. В работе [Б3] это теоретическое предсказание было впервые подтверждено экспериментально. Был реализован первый в мире поляритонный лазер на основе GaN, работающий при комнатной температуре. В работе [1] изучен поляритонный лазер на основе GaN с электронной инжекцией. Показано, что этот прибор является когерентным источником поляризованного света. В работе [2] поляритонный лазер, работающий при комнатной температуре, реализован на основе двумерного кристалла WSe<sub>2</sub> толщиной в один моноатомный слой. В последние годы, по данной тематике кандидатом опубликованы также работы [3-8]

### **2) Спонтанный рост векторной поляризации излучения поляритонного лазера на пороге конденсации.**

В работе [Б4] показано, что порог возникновения поляритонного конденсата характеризуется резким ростом степени линейной поляризации света, излучаемого микрорезонатором. Плоскость линейной поляризации излученного света определяется направлением кристаллографических осей микрорезонатора, что является проявлением пининга линейной поляризации. В работе [Б5] введено понятие двухкомпонентного (спинорного) параметра порядка для фазового перехода с образованием Бозе-Эйнштейновского конденсата экситонных поляритонов. Формирование параметра порядка при образовании поляритонного конденсата экспериментально детектировано путем измерения трех компонент

вектора Стокса излучения поляритонного конденсата. В работе [9] аналогичный эксперимент проделан в широком температурном диапазоне: от 4 до 200 К. Показано, что пининг поляризации конденсата исчезает с ростом температуры. Это явление описано теоретически в рамках оригинальной модели. В последние годы, по данной тематике кандидатом опубликованы также работы [10, 11].

### **3) Оптический спиновый эффект Холла.**

В работе [Б6] предсказан и теоретически описан оптический спиновый эффект Холла. Эффект проявляется в характерной поляризационной зависимости рэлеевского рассеяния экситонных поляритонов в плоскости микрорезонатора. В частности, при рассеянии линейно поляризованного волнового пакета поляритонов поляризационная диаграмма света, излученного микрорезонатором, приобретает форму бабочки. Эффект обусловлен спин-орбитальным взаимодействием экситонных поляритонов, возникающим благодаря ТЕ-ТМ расщеплению оптических мод микрорезонатора. В работе [Б7] оптический спиновый эффект Холла впервые обнаружен экспериментально в соответствии с теоретическим предсказанием. В работе [12] этот эффект наблюдается в поляритонном лазере, где он является следствием баллистического распространения поляритонного конденсата в стороны от пятна накачки. В работе [13] показано, что соревнование между долинным и спиновым эффектами Холла в двумерных кристаллах диэлектрических переходных металлов приводит к возникновению характерной поляризационной диаграммы. В последние годы по данной тематике кандидатом опубликованы также работы [14-17].

### **4) Таммовские фотоны и плазмоны.**

В работе [Б8] предложена концепция оптических таммовских состояний, локализованных на границе двух разных диэлектрических брэгговских отражателей. Показано, что таммовская мода может позволить реализовать

поляритонный лазер без лазерной полости, что важно для уменьшения объема оптической моды и усиления лазерного эффекта. В работе [Б9] концепция таммовских состояний света распространена на метал-диэлектрические структуры, где оптическая мода оказывается локализована на границе между металлическим и диэлектрическим зеркалами. Такое состояние получило название «таммовский плазмон». В работе [Б10] таммовские плазмоны впервые наблюдались экспериментально в соответствии с теоретическим предсказанием. В работе [18] экспериментально продемонстрирован режим сильной связи таммовского плазмона и экситона, приводящий к возникновению мод таммовских плазмон-поляритонов. В работе [19] таммовские плазмон-поляритоны изучены в микрорезонаторе, включающем в себя как квантовую яму из арсенида галлия, так и моноатомный слой диселенида молибдена. Благодаря взаимодействию с таммовской модой достигнута гибридизация экситонных состояний в двух полупроводниковых материалах.

#### **5) Дисперсия возбужденных состояний спиринового конденсата поляритонов.**

В работе [Б11] исследован спектр элементарных возбуждений Бозе-Эйнштейновского конденсата экситонных поляритонов с учетом спин-зависимого поляритон-поляритонного взаимодействия. Показано, что в отличие от сверхтекучего гелия сверхтекучий поляритонный конденсат характеризуется не одной, а двумя скоростями звука, описывающими возбуждения, поляризованные параллельно и перпендикулярно конденсату. В работе [Б12] учтены также эффекты внешнего магнитного поля и расщепления линейно поляризованных состояний поляритонов, возникающие из-за анизотропии микрорезонатора. Показано, что при определенных условиях возбуждения в одной из поляризаций оказываются отделены от конденсата энергетической щелью. В последние годы, по данной тематике кандидатом опубликованы также работы [Б13, 20].



## **6) Спиновый эффект Мейсснера для поляритонного конденсата.**

В работе [21] теоретически изучено влияние внешнего магнитного поля на бозонный конденсат взаимодействующих экситонных поляритонов. Показано, что благодаря зависимости константы поляритон-поляритонного взаимодействия от спиновой ориентации поляритонов, зеемановское расщепление поляритонного конденсата оказывается полностью подавлено в магнитных полях ниже критического поля, величина которого определяется значением констант взаимодействия и концентрацией поляритонов. В работе [Б14] модель из работы [21] обобщена на случай локализованного поляритонного конденсата. Показано, что в докритическом режиме зависимость спиновой поляризации конденсата от внешнего магнитного поля принимает форму лестницы. В работах [22] и [23] предсказанные явления исследовались экспериментально. Показано, что неравновесная природа поляритонного конденсата приводит к изменениям в зависимостях зеемановского расщепления и степени циркулярной поляризации конденсата от магнитного поля. Важную роль начинает играть резервуар несконденсированных экситонов.

## **7) Динамика доменных стенок в бистабильной поляритонной системе.**

В работе [Б15] показано, что лазерное возбуждение полупроводникового микрорезонатора на частоте, слегка превышающей собственную частоту поляритонной моды, приводит к явлению мультстабильности, когда конденсат может формироваться в различных поляризационных состояниях. В работе [Б16] предложена концепция «поляритонных нейронов», основанная на предсказанной динамике доменных стенок, отделяющих одну стабильную область поляритонной системы от другой в режиме бистабильности. В частности, показано, что доменная стенка будет распространяться по каналу в плоскости микрорезонатора со скоростью, зависящей от отстройки частоты возбуждающего лазера от

собственной частоты поляритонной моды. В работе [Б17] предложено создание оптических интегральных схем, в которых информация будет распространяться за счет движения доменных стенок. В последние годы, по данной тематике кандидатом опубликована также работа [24].

### **8) Бозонный каскадный лазер.**

В работе [25] сформулирована концепция бозонного каскадного лазера, в котором излучение субмиллиметровых волн стимулируется заселенностью эквидистантных мод поляритонного лазера, образованных за счет квантования поляритонного конденсата в параболической ловушке. В работе [26] показано, что стимулированные переходы в бозонном каскадном лазере существенно влияют на квантовую статистику поляритонных конденсатов, приводя, в частности, к явлению супербанчинга, когда когерентность второго порядка,  $g_2(0)$ , света, излученного поляритонным конденсатом, поднимается существенно выше классического предела:  $g_2(0) > 0$ . В работе [27] этот эффект наблюдался экспериментально в микропроводе на основе оксида цинка в точном соответствии с теоретическим предсказанием. В последние годы, по данной тематике кандидатом опубликована также работа [28].

### **9) Сверхпроводимость, индуцированная бозонным конденсатом поляритонов.**

В работе [Б18] предложен новый механизм формирования куперовских пар – за счет обмена виртуальными возбуждениями экситонного или экситон-поляритонного конденсата. Показано, что критическая температура сверхпроводящего перехода в этом случае будет возрастать с возрастанием концентрации экситонов (поляритонов) в конденсате. Это дает возможность достичь высоких критических температур сверхпроводящего перехода в гибридных микрорезонаторных структурах, содержащих полупроводниковые

квантовые ямы и тонкие слои металла. Работа [29] содержит обзор теоретических исследований, посвященных сверхпроводимости, индуцированной экситонами. Указаны пути экспериментальной реализации предложенного эффекта. В работе [30] рассмотрена структура, в которой поляритонный конденсат соседствует со сверхпроводником. Показано, что при определенных условиях сочетание фононного с экситонным механизмом образования куперовских пар приводит к резонансному повышению критической температуры сверхпроводящего перехода. В последние годы, по данной тематике кандидатом опубликована также работа [31].

#### **10) Спонтанная генерация сверхтекучих токов в поляритонном конденсате.**

В работе [32] экспериментально обнаружен и теоретически описан эффект спонтанного нарушения пространственной симметрии поляритонного конденсата в одномерном периодическом потенциале. Показано, что эффект является следствием соревнования между туннельным и диссипативным механизмами взаимодействия между локализованными конденсатами экситонных поляритонов. В работе [33] соревнование между этими двумя механизмами взаимодействия изучено теоретически и экспериментально в системе из двух локализованных поляритонных конденсатов. В теоретической работе [34] предсказано возникновение спонтанных сверхтекучих токов экситонных поляритонов в комплексных периодических потенциалах. В последние годы, по данной тематике кандидатом опубликованы также работы [14, 35, 36].

### Основные положения, выносимые на защиту

1) Неравновесная Бозе-Эйнштейновская конденсация экситонных поляритонов может быть реализована при комнатной температуре в микрорезонаторах на основе широкозонных полупроводников. [1-8]

2) Спонтанная поляризация поляритонного конденсата играет роль параметра порядка фазового перехода к конденсированному состоянию в равновесном пределе. [9-11]

3) ТЕ-ТМ расщепление фотонных мод в микрорезонаторе приводит к оптическому спиновому эффекту Холла для экситонных поляритонов. Эффект состоит в пространственном разделении рассеянных поляритонов в соответствии с их спиновой поляризацией. [12-17]

4) Таммовские фотонные или плазмонные состояния, образующиеся на границе двух разных диэлектрических или диэлектрического и металлического зеркал, соответственно, могут быть использованы для создания поляритонных лазеров без лазерной полости. [18-19]

5) Спиновая зависимость поляритон-поляритонного взаимодействия приводит к расщеплению спектра возбужденных состояний поляритонного конденсата. [20]

6) В равновесном пределе зеемановское расщепление Бозе-Эйнштейновского конденсата экситонных поляритонов подавлено за счет спин-зависимого поляритон-поляритонного взаимодействия. Это явление наблюдается до тех пор, пока внешнее магнитное поле не превысит критическую величину, зависящую от концентрации поляритонов. [21-23]

7) Пространственно ограниченное квази-резонансное оптическое возбуждение поляритонного конденсата в сочетании с делокализованным нерезонансным возбуждением может привести к появлению домена высокой плотности поляритонов. Скорость движения стенок такого домена может контролироваться частотой квази-резонансной накачки. [24]

8) Стимулированные переходы между эквидистантными модами поляритонного лазера могут сопровождаться генерацией электромагнитного излучения в суб-миллиметровом диапазоне. Этот эффект лежит в основе действия бозонного каскадного лазера. [25-28]

9) Виртуальные возбуждения Бозе-Эйнштейновского конденсата экситонных поляритонов могут заменить фононы при образовании куперовских пар в слое металла, расположенного в близкой окрестности поляритонного конденсата. Электрон-электронное притяжение в куперовской паре будет возрастать с ростом концентрации поляритонов в конденсате. [29-31]

10) Диссипативная связь пространственно разделенных поляритонных конденсатов может приводить к спонтанной генерации сверхтекучих токов экситонных поляритонов. [32-36]

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- Б1. Zamfirescu M., **Kavokin A.V.**, Gil B., Malpuech G., Kaliteevski M. ZnO as a material mostly adapted for the realization of room-temperature polariton lasers// Phys. Rev. B.2002. Т. 65, вып. 16. С. 161205.
- Б2. Malpuech G., DiCarlo A., **Kavokin A.V.**, Baumberg J.J., Zamfirescu M., Lugli P. Room-temperature polariton lasers based on GaN microcavities// Appl. Phys. Lett. 2002. Т.81, вып. 3. С. 412-414.
- Б3. Christopoulos S., von Hogersthal G.B.H., Grundy A.J.D., Lagoudakis P.G., **Kavokin A.V.**, Baumberg J.J., Christmann G., Butte R., Feltin E., Carlin J.F., Grandjean N. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities// Phys. Rev. Lett. 2007. Т. 98, вып. 12., С. 126405.
- Б4. Kasprzak J., Andre R., Dang L.S., Shelykh I.A., **Kavokin A.V.**, Rubo Y.G., Kavokin K.V., Malpuech G. Build up and pinning of linear polarization in the Bose condensates of exciton polaritons// Phys. Rev. B. 2007. Т. 75, вып. 4. С. 045326.
- Б5. Baumberg J.J., **Kavokin A.V.**, Christopoulos S., Grundy A.J.D., Butte R., Christmann G., Solnyshkov D.D., Malpuech G., von Hogersthal G.B.H., Feltin E., Carlin J.F., Grandjean N. Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser// Phys. Rev. Lett. 2008. Т. 101, вып. 13. С. 136409.
- Б6. **Kavokin A.**, Malpuech G., Glazov M. Optical spin Hall effect// Phys. Rev. Lett. 2005. Т. 95, вып. 13. С. 136601.
- Б7. Leyder C., Romanelli M., Karr J.P., Giacobino E., Liew T.C.H., Glazov M.M., **Kavokin A.V.**, Malpuech G., Bramati A. Observation of the optical spin Hall effect// Nat. Phys. 2007. Т. 3, вып. 9. С. 628-631.
- Б8. **Kavokin A.V.**, Shelykh I., Malpuech G. Optical Tamm states for the fabrication of polariton lasers// Appl. Phys. Lett. 2005. Т. 87, вып. 26. С. 261105.
- Б9. Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A., Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror// Phys. Rev. B. 2007. Т. 76, вып. 16. С. 165415.

- Б10. Sasin M.E., Seisyan R.P., Kalitseevski M.A., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Egorov A.Y., Vasil'ev A.P., Mikhrin V.S., **Kavokin A.V.** Tamm plasmon polaritons: Slow and spatially compact light// *Appl. Phys. Lett.* 2008. Т. 92, вып. 25. С. 251112.
- Б11. Shelykh I.A., Rubo Y.G., Malpuech G., Solnyshkov D.D., **Kavokin A.V.** Polarization and propagation of polariton condensates// *Phys.Rev. Lett.* 2006. Т. 97, вып. 6. С. 66402.
- Б12. Shelykh I.A., Rubo Y.G., **Kavokin A.V.** Renormalized dispersion of elementary excitations in spinor polariton condensates// *Superlattices Microstruct.* 2007. Т. 41, вып. 43957. С. 313-320.
- Б13. Rubo Y.G., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A. Suppression of superfluidity of exciton-polaritons by magnetic field// *Phys. Lett. A.* 2006. Т. 358, вып. 3. С. 227-230.
- Б14. Liew T.C.H., Rubo Y.G., Shelykh I.A., **Kavokin A.V.** Suppression of Zeeman splitting and polarization steps in localized exciton-polariton condensates// *Phys. Rev. B.* 2008. Т. 77, вып. 12. С. 125339.
- Б15. Gippius N.A., Shelykh I.A., Solnyshkov D.D., Gavrillov S.S., Rubo Y.G., **Kavokin A.V.**, Tikhodeev S.G., Malpuech G. Polarization multistability of cavity polaritons// *Phys. Rev. Lett.* 2007. Т. 98, вып. 23. С. 236401.
- Б16. Liew T.C.H., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A. Optical circuits based on polariton neurons in semiconductor microcavities// *Phys. Rev. Lett.* 2008. Т. 101, вып.1. С. 16402.
- Б17. **Kavokin A.V.**, Ostatnicky T., Kalitseevski M., Liew T.C.H., Shelykh I.A., Abram R.A. Exciton-polariton integrated circuits // *Phys. Rev. B.* – 2010. – Т. 82, вып. 3. – С. 33302.
- Б18. Laussy F.P., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A. Exciton-Polariton Mediated Superconductivity // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. Т. 104, вып. 10. – С. 106402.

**Основные публикации автора по теме диссертационной работы**

1. Bhattacharya A., Baten M.Z., Iorsh I., Frost T., **Kavokin A.V.**, Bhattacharya P. Room-Temperature Spin Polariton Diode Laser// Phys. Rev. Lett. 2017. Т. 119, вып. 6. С. 067701.
2. Shan H.Y., Lackner L., Han B., Sedov E., Rupprecht C., Knopf H., Eilenberger F., Beierlein J., Kunte N., Esmann M., Yumigeta K., Watanabe K., Taniguchi T., Klembt S., Höfling S., **Kavokin A.V.**, Tongay S., Schneider C., Antón-Solanas C. Spatial coherence of room-temperature monolayer WSe<sub>2</sub> exciton-polaritons in a trap// Nat Commun. 2021. Т. 12. С. 6406.
3. Ohadi H., Kammann E., Liew T.C.H., Lagoudakis K.G., **Kavokin A.V.**, Lagoudakis P.G. Spontaneous Symmetry Breaking in a Polariton and Photon Laser// Phys. Rev. Lett. 2012. Т. 109, вып. 1. С. 16404.
4. Dominici L., Petrov M., Matuszewski M., Ballarini D., De Giorgi M., Colas D., Cancellieri E., Fernandez B.S., Bramati A., Gigli G., **Kavokin A.V.**, Laussy F., Sanvitto D. Real-space collapse of a polariton condensate// Nat. Commun. 2015. Т. 6. С. 8993.
5. Waldherr M., Lundt N., Klaas M., Betzold S., Wurdack M., Baumann V., Estrecho E., Nalitov A., Cherotchenko E., Cai H., Ostrovskaya E.A., **Kavokin A.V.**, Tongay S., Klembt S., Hofling S., Schneider C. Observation of bosonic condensation in a hybrid monolayer MoSe<sub>2</sub>-GaAs microcavity// Nat. Commun. 2018. Т. 9. С. 3286.
6. Ballarini D., Chestnov I., Caputo D., De Giorgi M., Dominici L., West K., Pfeiffer L.N., Gigli G., **Kavokin A.V.**, Sanvitto D. Self-Trapping of Exciton-Polariton Condensates in GaAs Microcavities// Phys. Rev. Lett. 2019. Т. 123, вып. 4. С. 47401.
7. Anton-Solanas C., Waldherr M., Klaas M., Suchomel H., Harder T.H., Cai H., Sedov E., Klembt S., **Kavokin A.V.**, Tongay S., Watanabe K., Taniguchi T., Hofling S., Schneider C. Bosonic condensation of exciton-polaritons in an atomically thin crystal// Nat. Mater. 2021. Т. 20. С. 1233-1239.



8. **Kavokin A.V.**, Liew T.C.H., Klembt S., Schneider C., Lagoudakis P. and Hoefling S. Polaritonics for classical and quantum computing// Nature Reviews Physics. 2022. <https://doi.org/10.1038/s42254-022-00447-1>.
9. Balas Y.C., Sedov E.S., Paschos G.G., Hatzopoulos Z., Ohadi H., **Kavokin A.V.**, Savvidis P. G. Stochastic single-shot polarisation pinning of a polariton condensate at high temperatures// Phys. Rev. Lett. 2022. T. 128. C. 117401.
10. Li G., Sheremet A.S., Ge R., Liew T.C.H., **Kavokin A.V.** Design for a Nanoscale Single-Photon Spin Splitter for Modes with Orbital Angular Momentum// Phys. Rev. Lett. 2018. T. 121, вып. 5. C. 53901.
11. Trifonov A.V., Khramtsov E.S., Kavokin K.V., Ignatiev I.V., **Kavokin A.V.**, Efimov Y.P., Eliseev S.A., Shapochkin P.Y., Bayer M. Nanosecond Spin Coherence Time of Nonradiative Excitons in GaAs/AlGaAs Quantum Wells// Phys. Rev. Lett. 2019. T. 122, вып. 14. C. 147401.
12. Kammann E., Liew T.C.H., Ohadi H., Cilibrizzi P., Tsotsis P., Hatzopoulos Z., Savvidis P.G., **Kavokin A.V.**, Lagoudakis P.G. Nonlinear Optical Spin Hall Effect and Long-Range Spin Transport in Polariton Lasers// Phys. Rev. Lett. 2012. T. 109, вып. 3. C. 036404.
13. Lundt N., Dusanowski L., Sedov E., Stepanov P., Glazov M.M., Klembt S., Klaas M., Beierlein J., Qin Y., Tongay S., Richard M., **Kavokin A.V.**, Hofling S., Schneider C. Optical valley Hall effect for highly valley-coherent exciton-polaritons in an atomically thin semiconductor// Nat. Nanotechnol. 2019. T. 14, вып. 8. C. 770.
14. High A.A., Hammack A.T., Leonard J.R., Yang S., Butov L.V., Ostatnicky T., Vladimirova M., **Kavokin A.V.**, Liew T.C.H., Campman K.L., Gossard A.C. Spin Currents in a Coherent Exciton Gas// Phys. Rev. Lett. 2013. T. 110, вып. 24. C. 246403.
15. Colas D., Dominici L., Donati S., Pervishko A.A., Liew T.C.H., Shelykh I.A., Ballarini D., de Giorgi M., Bramati A., Gigli G., del Valle E., Laussy F.P., **Kavokin A.V.**, Sanvitto D. Polarization shaping of Poincare beams by polariton oscillations// Light-Sci. Appl. 2015. T. 4. C. e350.

16. Sedov E.S., Rubo Y.G., Kavokin A.V. Polariton polarization rectifier// *Light-Sci. Appl.* 2019. T. 8. C. 79.
17. Kozin V.K., Shabashov V.A., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A. Anomalous Exciton Hall Effect// *Phys. Rev.Lett.* 2021. T. 126. C. 036801.
18. Lundt N., Klemmt S., Cherotchenko E., Betzold S., Iff O., Nalitov A.V., Klaas M., Dietrich C.P., **Kavokin A.V.**, Hofling S., Schneider C. Room-temperature Tamm-plasmon exciton-polaritons with a WSe<sub>2</sub> monolayer// *Nat. Commun.* 2016. T. 7. C. 13328.
19. Wurdack M., Lundt N., Klaas M., Baumann V., **Kavokin A.V.**, Hofling S., Schneider C. Observation of hybrid Tamm-plasmon exciton-polaritons with GaAs quantum wells and a MoSe<sub>2</sub> monolayer// *Nat. Commun.* 2017. T. 8. C. 259.
20. Matuszewski M., Taylor T., **Kavokin A.V.** Exciton Supersolidity in Hybrid Bose-Fermi Systems// *Phys. Rev. Lett.* 2012. T. 108, вып. 6. C. 60401.
21. Boulier T., Cancellieri E., Sangouard N.D., Glorieux Q., **Kavokin A.V.**, Whittaker D.M., Giacobino E., Bramati A. Injection of Orbital Angular Momentum and Storage of Quantized Vortices in Polariton Superfluids// *Phys. Rev. Lett.* 2016. T. 116, вып. 11ю C. 116402.
22. Fischer J., Brodbeck S., Chernenko A.V., Lederer I., Rahimi-Iman A., Amthor M., Kulakovskii V.D., Worschech L., Kamp M., Durnev M., Schneider C., **Kavokin A.V.**, Hofling S. Anomalies of a Nonequilibrium Spinor Polariton Condensate in a Magnetic Field// *Phys. Rev. Lett.* 2014. T. 112, вып. 9. C. 093902.
23. Krol M., Mirek R., Stephan D., Lekenta K., Rousset J.G., Pacuski W., **Kavokin A.V.**, Matuszewski M., Szczytko J., Pietka B. Giant spin Meissner effect in a nonequilibrium exciton-polariton gas// *Phys. Rev. B.* 2019. T. 99, вып. 11. C. 115318.
24. Gao T., Li G., Estrecho E., Liew T.C.H., Comber-Todd D., Nalitov A., Steger M., West K., Pfeiffer L., Snoke D.W., **Kavokin A.V.**, Truscott A.G., Ostrovskaya E.A. Chiral Modes at Exceptional Points in Exciton-Polariton Quantum Fluids// *Phys. Rev. Lett.* 2018. T. 120, вып. 6. C. 65301.

25. Liew T.C.H., Glazov M.M., Kavokin K.V., Shelykh I.A., Kaliteevski M.A., **Kavokin A.V.** Proposal for a Bosonic Cascade Laser // *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – Т. 110, **ВЫП.** 4. – С. 047402.
26. Liew T.C.H., Rubo Y.G., Sheremet A.S., De Liberato S., Shelykh I.A., Laussy F.P., **Kavokin A.V.** Quantum statistics of bosonic cascades // *New J. Phys.* – 2016. – Т. 18. – С. 23041.
27. Chen F., Zhou H., Li H., Cao J.H., Luo S., Sun Z., Zhang Z., Shao Z.Q., Sun F.H., Zhou B., Dong H.X., Xu H.X., **Kavokin A.V.**, Chen Z.H., Wu J. Femtosecond dynamics of polariton bosonic cascades at room temperature // *Nano Letters.* 2022. – Т.22, **ВЫП.** 5. – С. 2023-2029.
28. **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A., Taylor T., Glazov M.M. Vertical Cavity Surface Emitting Terahertz Laser// *Phys. Rev. Lett.* 2012. Т. 108, **ВЫП.** 19. С .197401.
29. **Kavokin A.V.**, Lagoudakis P. Exciton-polariton condensates: Exciton-mediated superconductivity// *Nat. Mater.* – 2016. – Т. 15, **ВЫП.** 6. – С. 599-600.
30. Skopelitis P., Cherotchenko E.D., **Kavokin A.V.**, Posazhennikova A. Interplay of Phonon and Exciton-Mediated Superconductivity in Hybrid Semiconductor-Superconductor Structures // *Phys. Rev. Lett.* – 2018. – Т. 120, **ВЫП.** 10. – С. 107001.
31. **Kavokin A.V.**, Galperin Y.M., Varlamov A.A. Proposed Model of the Giant Thermal Hall Effect in Two-Dimensional Superconductors: An Extension to the Superconducting Fluctuation Regime// *Phys. Rev. Lett.* 2020. Т. 125. С. 217005.
32. Zhang L., Xie W., Wang J., Poddubny A., Lu J., Wang Y.L., Gu J., Liu W.H., Xu D., Shen X.C., Rubo Y.G., Altshuler B.L., **Kavokin A.V.**, Chen Z.H. Weak lasing in one-dimensional polariton superlattices // *PNAS.* – 2015. – Т. 112, **ВЫП.** 13. – С. 1516-1519.
33. Ohadi H., Gregory R.L., Freearde T., Rubo Y.G., **Kavokin A.V.**, Berloff N.G., Lagoudakis P.G. Nontrivial Phase Coupling in Polariton Multiplets // *Phys. Rev. X.* – 2016. – Т. 6, **ВЫП.** 3 С 31032.
34. Nalitov A.V., Liew T.C.H., **Kavokin A.V.**, Altshuler B.L., Rubo Y.G. Spontaneous Polariton Currents in Periodic Lateral Chains // *Phys. Rev. Lett.* – 2017. – Т. 119, **ВЫП.** 6. – С. 67406.

35. High A.A., Leonard J.R., Hammack A.T., Fogler M.M., Butov L.V., **Kavokin A.V.**, Campman K.L., Gossard A.C. Spontaneous coherence in a cold exciton gas// Nature 2012. Т. 483, вып. 7391. С. 584-588.
36. Andreev S.V., Varlamov A.A., **Kavokin A.V.** Scale Invariance and Universality in a Cold Gas of Indirect Excitons// Phys. Rev. Lett. 2014. Т. 112, вып. 3. С. 36401.

SAINT PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Manuscript copy

Kavokin Alexey Vitalievich

**PHYSICS OF POLARITON LASERS**

Scientific specialization 1.3.8. Condensed matter physics

Scientific report for the degree of Doctor of physical and mathematical sciences

Translation from Russian

Saint-Petersburg

2022

## Introduction

A polariton laser is a coherent light emitter based on the Bose-Einstein condensate of light-matter quasiparticles: exciton-polaritons [A1]. Bosonic condensates of exciton-polaritons possess a number of unique physical properties which make the physics of polariton lasers rich on experimentally observable remarkable effects. In this work, we develop a theory of polariton lasers that encompasses their optical, spin, statistic and other properties. We predict a number of new effects. Some of these predictions have been experimentally confirmed already.

An exciton-polariton is a quasi-particle formed in the regime of strong coupling between a photon mode and an exciton resonance in a semiconductor structure. A wave-function of the exciton-polariton is a superposition of exciton and photon components [A2]. An exciton polariton (polariton) is a composite boson. The Bose-Einstein condensation and superfluidity of exciton-polaritons have been observed experimentally in a wide temperature range including also the room temperature in some cases [A3, A4]. The concept of a polariton laser has been formulated in mid-1990s when the experimental evidence for the strong light-matter coupling regime in semiconductor microcavities opened a perspective for generation of bosonic condensates of light-matter quasiparticles: exciton-polaritons [A5]. A polariton laser is based on an ability of polariton condensates to emit light. Light goes out by tunnelling through the Bragg mirrors that confine a semiconductor microcavity. The emission is spontaneous that constitutes one of the main differences of a polariton laser from a conventional laser that produces light by stimulated emission. The spontaneous emission of light by exciton-polaritons is necessarily present in any realistic structure, which is why it is sufficient to create a Bose-Einstein condensate of polaritons in order to create a polariton laser. Light emitted by a bosonic condensate is coherent and monochromatic because of the energy and wavevector conservation laws. The polarization of emitted light coincides with the vector polarisation of the condensate [A6]. It is important to note that a bosonic condensate of polaritons in a polariton laser does not find itself in a thermal equilibrium with the crystal lattice, usually. Moreover, the condensate may be

formed in any quantum state, not necessarily in the lowest energy one. The condensate formation starts once the income rate of polaritons to a given quantum state exceeds their escape rate (by escape we mean the radiative recombination and any kind of scattering or Auger process). Hence, the threshold pump power of a polariton laser is given by the kinetics of polariton inflow to the condensate and their outflow from the condensate. This threshold power may be much lower than one of conventional semiconductor lasers that is governed by the inversion of electronic population condition [A7]. This difference of thresholds constitutes the second qualitative difference between polariton and conventional lasers. The third difference is linked to the polarization degree of freedom. As a rule, conventional semiconductor lasers emit linearly polarised light. The orientation of its polarisation plane is defined by the polarisation of the optical mode that is excited due to the stimulated emission. In contrast, in polariton lasers, the polarization is either stochastic, being formed spontaneously [A8] or it is pinned due to the external factors such as the structure anisotropy, strain, applied electric and magnetic fields [A9]. A polariton laser offers a flexibility of tuning the polarization of its emission. A two-component (spinor) nature of polariton condensates plays an important role in physical processes taking place in polariton lasers. Due to the spinor nature of polariton condensates, spin Hall [A10] and spin Meissner [A11] effects predicted and studied in this work appear.

To summarize, the physics of polariton lasers is quite original and it strongly differs from the conventional laser physics formulated in the second half of the XXth century. A non-equilibrium nature and spin properties of polariton condensates as well as the relative simplicity of their realization in a wide range of semiconductor systems make the physics of polariton lasers a significant, rapidly developing area of modern physics that encompasses elements of statistical physics, spintronics, semiconductor optics, many-body physics. This work studies theoretically exciton-polariton condensates. It predicts a number of unique effects characteristic of polariton lasers. Some of these predictions have been already confirmed experimentally.

- A1. Kavokin A.V., Liew T.C.H., Klembt S., Schneider C., Lagoudakis P. and Hoefling S. Polaritonics for classical and quantum computing// *Nature Reviews Physics*. – 2022. – <https://doi.org/10.1038/s42254-022-00447-1>
- A2. Kavokin A.V., Baumber J.J., Malpuech G. and Laussy F.P.// *MICROCAVITIES*, Second Edition. - Oxford Science Publications.- -2017. - - Oxford. - 624 c.
- A3. Kasprzak, J. et al. Bose–Einstein condensation of exciton polaritons// *Nature*. - 2006. –Vol. 443. – P. 409–414.
- A4. Christopoulos S., von Högersthal G. Baldassarri, Grundy A. J., Lagoudakis P. G., Kavokin A. V., Baumberg J. J., Christmann G., Butté R., Feltin E., Carlin J.-F., and Grandjean N. Room-Temperature Polariton Lasing in Semiconductor Microcavities// *Phys. Rev. Lett.* – 2007. Vol. 98. – P. 126405.
- A5. Imamoğlu A., Ram R. J., Pau S. & Yamamoto Y. Nonequilibrium condensates and lasers without inversion: exciton–polariton lasers// *Phys. Rev. A*. 1996. – Vol. 53. – P. 4250–4253.
- A6. Shelykh I.A., Rubo Y.G., Malpuech G., Solnyshkov D.D., Kavokin A.V. Polarization and propagation of polariton condensates// *Phys.Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 97. – P. 66402.
- A7. Bhattacharya P., Xiao B., Das A., Bhowmick S. and Heo J. Solid state electrically injected exciton–polariton laser// *Phys. Rev. Lett.* – 2013. Vol. 110. – P. 206403.
- A8. Baumberg J.J., Kavokin A.V., Christopoulos S., Grundy A.J.D., Butte R., Christmann G., Solnyshkov D.D., Malpuech G., von Hogersthal G.B.H., Feltin E., Carlin J.F., Grandjean N. Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser// *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 101, issue. 13. – P. 136409.
- A9. Kasprzak J., Andre Rio, Dang L.S., Shelykh I.A., Kavokin A.V., Rubo Y.G., Kavokin K.V., Malpuech G. Build up and pinning of linear polarization in the Bose condensates of exciton polaritons// *Phys. Rev. B*. – 2007. Vol. 75,issue 4. – P. 45326.
- A10. Kavokin A.V., Malpuech G. and Glazov M. Optical spin Hall effect // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 95. – P. 136601.



A11. Krol M., Mirek R., Stephan D., Lekenta K., Rousset J.G., Pacuski W., Kavokin A.V., Matuszewski M., Szczytko J., Pietka B. Giant spin Meissner effect in a nonequilibrium exciton-polariton gas// Phys. Rev. B. – 2019. Vol. 99, issue 11. – P. 115318.

## **Brief description of the main results obtained by the candidate.**

### **1) Non-equilibrium Bose-Einstein condensation of exciton-polaritons at room temperature.**

Publications [B1, B2] demonstrate theoretically that microcavities based on wide-bandgap semiconductors ZnO and GaN constitute suitable systems for the observation of the Bose-Einstein condensation of exciton-polaritons at the room temperature. In [B3] this theoretical prediction has been confirmed experimentally. The world first polariton laser operating at the room temperature has been realised in a GaN microcavity. In [1] a room temperature GaN polariton laser with electrical injection has been studied experimentally and theoretically. It was shown that this device emits coherent and polarised light. [2] reports on the experimental and theoretical study of a room temperature polariton laser based on a one-monolayer thick two-dimensional crystal WSe<sub>2</sub>. This topic has been developed by the candidate in the recent works [3-8].

### **2) Spontaneous increase of the vector polarization of a polariton laser at the threshold of bosonic condensation.**

In [B4], we show that the threshold to formation of the polariton condensate is characterised by a rapid increase of the linear polarization degree of light emitted by a microcavity. The plane of linear polarization of an emitted light is pinned to one of the crystallographic axes of the structure. In [B5], we introduced a two-component (spinor) order parameter for the phase transition towards the formation of a Bose-Einstein condensate of exciton-polaritons. The build-up of the order parameter is experimentally detected by single-shot measurements of the three components of the Stokes vector of the condensate. In [9], a similar experiment has been realised in a wide temperature range: from 4 to 200 K. The suppression of the pinning of vector polarization with the increase of temperature has been documented. This effect is theoretically described in

the framework of an original model. The topic has been developed by the candidate in the recent works [10, 11].

### **3) The optical spin Hall effect.**

In [B6] we predicted and theoretically described the optical spin Hall effect. The effect consists in a characteristic polarization dependence of the Rayleigh scattering of exciton-polaritons in a plane of a semiconductor microcavity. In particular, the circular polarization distribution resulting from a scattering of a linearly polarized wave-packet takes a butterfly shape. The effect is caused by the spin-orbit interaction of exciton-polaritons that arises due to the TE-TM splitting of the optical modes of the cavity. In [B7] the optical spin Hall effect has been experimentally observed in full agreement with our theoretical prediction. In [12] this effect has been studied in a polariton laser where it resulted from the ballistic propagation of a polariton condensate repelled from the pumping spot. [13] shows that the interplay between the valley Hall effect and the optical spin Hall effect in two-dimensional crystals of transition metal dichalcogenides leads to the appearance of a characteristic polarization distribution in the real space. This topic has been developed by the candidate in the recent works [14-17].

### **4) Tamm photons and plasmons.**

In [B8], we have proposed a concept of optical Tamm states localised at the boundary of two different dielectric Bragg mirrors. We suggested that an optical Tamm mode may allow realising a cavity-free polariton laser, where the light-exciton coupling would be enhanced because of the lower volume of the optical mode. In [B9], the concept of Tamm states of light has been extended to metal-dielectric structures where an optical mode appears to be localised at the boundary between metal and a dielectric Bragg mirror. This state has been given a name “Tamm plasmon”. In [B10], Tamm plasmons have been detected experimentally, in full agreement with the theoretical prediction. In [18], we experimentally demonstrated the strong coupling regime

between a Tamm plasmon and an exciton that led to the appearance of a Tamm plasmon-polariton. In [19], Tamm exciton-polaritons have been studied experimentally and theoretically in a hybrid microcavity with embedded GaAs quantum well and a monoatomic layer of MoSe<sub>2</sub>. The hybridisation of excitonic states in two different semiconductor materials is achieved due to their coupling to the Tamm optical mode.

### **5) The dispersion of excited states of a spinor condensate of exciton-polaritons.**

In [B11], we have studied the spectrum of elementary excitations of a Bose-Einstein condensate of exciton-polaritons accounting for the spin-dependent polariton-polariton interaction. We have shown that, in contrast to the superfluid He<sup>4</sup>, a superfluid polariton condensate is characterised by two sound velocities corresponding to the excitations polarised parallel and perpendicular to the condensate. In [B12], we have accounted also for the effects of external magnetic fields and of the splitting of linearly polarized polariton states that may arise due to the anisotropy of a microcavity. It is shown that at certain excitation conditions, one of the excitation branches appears to be separated from the condensate by an energy gap. This topic has been developed by the candidate in the recent works [B13, 20].

### **6) The spin Meissner effect for a polariton condensate**

In [21], we have studied theoretically the effect of an external magnetic field on a bosonic condensate of interacting exciton-polaritons. We have shown that due to the dependence of the polariton-polariton interaction strength on their mutual spin orientation, Zeeman splitting of a polariton condensate may be fully suppressed at the magnetic fields below some critical value dependent on the concentration of polaritons in the condensate and on the values of polariton-polariton interaction constants. In [B14], we have generalised the model of [21] to the case of a localised polariton condensate. We have shown that below the critical magnetic field the dependence of the

spin polarisation of the condensate on the magnetic field takes a shape of a staircase. In [22] and [23], the predicted phenomena have been studied experimentally, with our theoretical support. It has been shown that the non-equilibrium nature of polariton condensates leads to some changes in the dependencies of the Zeeman splitting and circular polarization degree as compared to the predictions of an equilibrium model. These changes reflect the role of a reservoir of non-condensed excitons that interacts with the condensate.

### **7) The dynamics of domain walls in a bi-stable polariton system.**

In [B15], we have shown that the laser pumping of a semiconductor microcavity at the frequency that slightly exceeds the eigen-frequency of the lower polariton mode may lead to the polarization multistability, the regime where the polariton condensate may be formed in several different polarization states. In [B16], we have proposed a concept of “polariton neurons”: communication channels based on the predicted motion of domain walls separating different stable phases of the polariton condensate in a bi-stability regime. In particular, we have shown that the speed of propagation of a domain wall in a channel built in-plane of a microcavity is controlled by the detuning of the excitation laser frequency and the eigen-frequency of the lower polariton mode. In [B17], we have proposed the concept of optical integrated circuits where the information would be spread due to the motion of polariton domain walls. This topic has been developed by the candidate in the recent work [24].

### **8) A bosonic cascade laser.**

In [25], we have formulated a concept of the bosonic cascade laser, a device where the emission of submillimetre electromagnetic waves is stimulated by populations of the equidistant modes of a polariton laser formed due to the quantum confinement of a polariton condensate in a parabolic trap. In [26], we show that stimulated transitions in a bosonic cascade laser may strongly affect the quantum

statistics of polariton condensates leading, in particular, to the superbunching effect, where the second order coherence of light emitted by the condensate  $g_2(0)$  strongly exceeds the classical limit:  $g_2(0) > 1$ . In [27], this effect is observed experimentally in a ZnO microwire, in full agreement with our theoretical prediction. This topic has been developed by the candidate in the recent work [28].

### **9) Superconductivity induced by a bosonic condensate of exciton-polaritons.**

In [B18], we have proposed a new mechanism of formation of electronic Cooper pairs: due to the exchange by virtual excitations of an exciton or exciton-polariton condensate. We have shown theoretically that the critical temperature of a superconducting phase transition should be increasing with the increase of the exciton (polariton) density in the condensate, in this case. This would offer an opportunity to achieve high critical temperatures of superconductivity in hybrid microcavities containing semiconductor quantum wells and thin metal films. [29] contains an overview of theoretical studies on exciton-mediated superconductivity. It points to the specific structures and systems where the predicted effect may be observed experimentally. In [30], we theoretically consider a microcavity structure where a polariton condensate is placed in the vicinity of a conventional superconductor. We show that the interplay between phonon and exciton mechanisms of formation of Cooper pairs may lead to the resonant enhancement of the critical temperature of the superconducting phase transition. This topic has been developed by the candidate in the recent work [31].

### **10) Spontaneous generation of superfluid currents in a polariton condensate.**

In [32], the effect of spontaneous symmetry breaking in a polariton condensate subjected to a one-dimensional periodic potential is theoretically described and

experimentally observed. It is shown that the effect is caused by the interplay between the tunnel and dissipative mechanisms of interaction between localised condensates of exciton-polaritons. In [33], the competition between these two effects is studied theoretically and experimentally in a system of two localised polariton condensates. The theoretical work [34] predicts a spontaneous generation of superfluid currents of exciton-polaritons in complex periodic potentials. This topic has been developed by the candidate in the recent works [14, 35, 36].

**Statements submitted to the defence:**

- 1) Non-equilibrium Bose-Einstein condensation of exciton-polaritons can be realised in microcavities based on wide band-gap semiconductors at the room temperature. [1-8]
- 2) In the limit of thermal equilibrium, the spontaneous polarisation of the ensemble of polaritons plays the role of an order parameter of the phase transition associated with the Bose-Einstein condensation of polaritons. [9-11]
- 3) TE-TM splitting of photon modes in a planar microcavity is responsible for the optical spin Hall effect for exciton-polaritons. The effect consists in the spatial separation of polaritons having opposite circular polarizations in the course of their elastic scattering. [12-17]
- 4) Tamm photon and plasmon states formed at the boundaries of different dielectric mirrors or dielectric and metal mirrors can be used for the realization of polariton lasers having no optical cavity. [18-19]
- 5) The spin-dependence of polariton-polariton interaction constant leads to the splitting in the spectrum of excitations of a polariton condensate. [20]
- 6) In the limit of thermal equilibrium, the Zeeman splitting of a Bose-Einstein condensate of exciton-polaritons is fully suppressed due to the spin-dependent polariton-polariton interaction. This effect takes place until the external magnetic field exceeds a critical value dependent on the concentration of polaritons. [21-23]
- 7) The spatially localized quasi-resonant pumping of an exciton-polariton condensate combined with the delocalised non-resonant pumping may lead to the formation of an expanding spatial domain characterised by a high density of polaritons. The dynamics of motion of the domain walls is governed by the frequency of quasi-resonant optical excitation in this case. [24]
- 8) Stimulated transitions between the modes of a polariton laser forming an equidistant energy spectrum may lead to the generation of electro-magnetic radiation in a sub-millimetre spectral range. This effect is responsible for bosonic cascade lasing. [25-28]



9) Virtual excitations of a Bose-Einstein condensate of exciton-polaritons may replace phonons as binding agents of Cooper pairs formed in a metallic layer placed in a close vicinity to the polariton condensate. The strength of electron-electron attraction would increase with the increase of the concentration of polaritons in the condensate in this case. [29-31]

10) The dissipative coupling between spatially separated polariton condensates may lead to the spontaneous generation of superfluid currents of exciton-polaritons. [32-36]

### References:

- B1 Zamfirescu M., **Kavokin A.V.**, Gil B., Malpuech G., Kaliteevski M. ZnO as a material mostly adapted for the realization of room-temperature polariton lasers// *Phys. Rev. B*.2002. Vol. 65, issue. 16. P. 161205.
- B2 Malpuech G., DiCarlo A., **Kavokin A.V.**, Baumberg J.J., Zamfirescu M., Lugli P. Room-temperature polariton lasers based on GaN microcavities// *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol.81, issue. 3. P. 412-414.
- B3 Christopoulos S., von Hogersthal G.B.H., Grundy A.J.D., Lagoudakis P.G., **Kavokin A.V.**, Baumberg J.J., Christmann G., Butte R., Feltin E., Carlin J.F., Grandjean N. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities// *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98, issue. 12., P. 126405.
- B4 Kasprzak J., Andre R., Dang L.S., Shelykh I.A., **Kavokin A.V.**, Rubo Y.G., Kavokin K.V., Malpuech G. Build up and pinning of linear polarization in the Bose condensates of exciton polaritons// *Phys. Rev. B.* 2007. Vol. 75, issue. 4. P. 045326.
- B5 Baumberg J.J., **Kavokin A.V.**, Christopoulos S., Grundy A.J.D., Butte R., Christmann G., Solnyshkov D.D., Malpuech G., von Hogersthal G.B.H., Feltin E., Carlin J.F., Grandjean N. Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser// *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101, issue. 13. P. 136409.
- B6 **Kavokin A.**, Malpuech G., Glazov M. Optical spin Hall effect// *Phys. Rev. Lett.* 2005. Vol. 95, issue. 13. P. 136601.
- B7 Leyder C., Romanelli M., Karr J.P., Giacobino E., Liew T.C.H., Glazov M.M., **Kavokin A.V.**, Malpuech G., Bramati A. Observation of the optical spin Hall effect// *Nat. Phys.* 2007. Vol. 3, issue. 9. P. 628-631.
- B8 **Kavokin A.V.**, Shelykh I., Malpuech G. Optical Tamm states for the fabrication of polariton lasers// *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 87, issue. 26. P. 261105.
- B9 Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A., Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror// *Phys. Rev. B.* 2007. Vol. 76, issue. 16. P. 165415.

- B10 Sasin M.E., Seisyan R.P., Kalitseevski M.A., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Egorov A.Y., Vasil'ev A.P., Mikhrin V.S., **Kavokin A.V.** Tamm plasmon polaritons: Slow and spatially compact light// *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 92, issue. 25. P. 251112.
- B11 Shelykh I.A., Rubo Y.G., Malpuech G., Solnyshkov D.D., **Kavokin A.V.** Polarization and propagation of polariton condensates// *Phys.Rev. Lett.* 2006. Vol. 97, issue. 6. P. 66402.
- B12 Shelykh I.A., Rubo Y.G., **Kavokin A.V.** Renormalized dispersion of elementary excitations in spinor polariton condensates// *Superlattices Microstruct.* 2007. Vol. 41, issue. 43957. P. 313-320.
- B13 Rubo Y.G., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A. Suppression of superfluidity of exciton-polaritons by magnetic field// *Phys. Lett. A.* 2006. Vol. 358, issue. 3. P. 227-230.
- B14 Liew T.C.H., Rubo Y.G., Shelykh I.A., **Kavokin A.V.** Suppression of Zeeman splitting and polarization steps in localized exciton-polariton condensates// *Phys. Rev. B.* 2008. Vol. 77, issue. 12. P. 125339.
- B15 Gippius N.A., Shelykh I.A., Solnyshkov D.D., Gavrillov S.S., Rubo Y.G., **Kavokin A.V.**, Tikhodeev S.G., Malpuech G. Polarization multistability of cavity polaritons// *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98, issue. 23. P. 236401.
- B16 Liew T.C.H., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A. Optical circuits based on polariton neurons in semiconductor microcavities// *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101, issue.1. P. 16402.
- B17 **Kavokin A.V.**, Ostatnicky T., Kalitseevski M., Liew T.C.H., Shelykh I.A., Abram R.A. Exciton-polariton integrated circuits // *Phys. Rev. B.* – 2010. – Vol. 82, issue. 3. – P. 33302.
- B18 Laussy F.P., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A. Exciton-Polariton Mediated Superconductivity // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. Vol. 104, issue. 10. – P. 106402.

**Main publications of the author within the scope of the dissertation:**

1. Bhattacharya A., Baten M.Z., Iorsh I., Frost T., **Kavokin A.V.**, Bhattacharya P. Room-Temperature Spin Polariton Diode Laser// *Phys. Rev. Lett.* 2017. Vol. 119, issue. 6. P. 067701.
2. Shan H.Y., Lackner L., Han B., Sedov E., Rupprecht C., Knopf H., Eilenberger F., Beierlein J., Kunte N., Esmann M., Yumigeta K., Watanabe K., Taniguchi T., Klembt S., Höfling S., **Kavokin A.V.**, Tongay S., Schneider C., Antón-Solanas C. Spatial coherence of room-temperature monolayer WSe<sub>2</sub> exciton-polaritons in a trap// *Nat Commun.* 2021. Vol. 12. P. 6406.
3. Ohadi H., Kammann E., Liew T.C.H., Lagoudakis K.G., **Kavokin A.V.**, Lagoudakis P.G. Spontaneous Symmetry Breaking in a Polariton and Photon Laser// *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109, issue. 1. P. 16404.
4. Dominici L., Petrov M., Matuszewski M., Ballarini D., De Giorgi M., Colas D., Cancellieri E., Fernandez B.S., Bramati A., Gigli G., **Kavokin A.V.**, Laussy F., Sanvitto D. Real-space collapse of a polariton condensate// *Nat. Commun.* 2015. Vol. 6. P. 8993.
5. Waldherr M., Lundt N., Klaas M., Betzold S., Wurdack M., Baumann V., Estrecho E., Nalitov A., Cherotchenko E., Cai H., Ostrovskaya E.A., **Kavokin A.V.**, Tongay S., Klembt S., Hofling S., Schneider C. Observation of bosonic condensation in a hybrid monolayer MoSe<sub>2</sub>-GaAs microcavity// *Nat. Commun.* 2018. Vol. 9. P. 3286.
6. Ballarini D., Chestnov I., Caputo D., De Giorgi M., Dominici L., West K., Pfeiffer L.N., Gigli G., **Kavokin A.V.**, Sanvitto D. Self-Trapping of Exciton-Polariton Condensates in GaAs Microcavities// *Phys. Rev. Lett.* 2019. Vol. 123, issue. 4. P. 47401.
7. Anton-Solanas C., Waldherr M., Klaas M., Suchomel H., Harder T.H., Cai H., Sedov E., Klembt S., **Kavokin A.V.**, Tongay S., Watanabe K., Taniguchi T., Hofling S., Schneider C. Bosonic condensation of exciton-polaritons in an atomically thin crystal// *Nat. Mater.* 2021. Vol. 20. P. 1233-1239.

8. **Kavokin A.V.**, Liew T.C.H., Klemmt S., Schneider C., Lagoudakis P. and Hoefling S. Polaritonics for classical and quantum computing// *Nature Reviews Physics*. 2022. <https://doi.org/10.1038/s42254-022-00447-1>.
9. Balas Y.C., Sedov E.S., Paschos G.G., Hatzopoulos Z., Ohadi H., **Kavokin A.V.**, Savvidis P. G. Stochastic single-shot polarisation pinning of a polariton condensate at high temperatures// *Phys. Rev. Lett.* 2022. Vol. 128. P. 117401.
10. Li G., Sheremet A.S., Ge R., Liew T.C.H., **Kavokin A.V.** Design for a Nanoscale Single-Photon Spin Splitter for Modes with Orbital Angular Momentum// *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 121, issue. 5. P. 53901.
11. Trifonov A.V., Khramtsov E.S., Kavokin K.V., Ignatiev I.V., **Kavokin A.V.**, Efimov Y.P., Eliseev S.A., Shapochkin P.Y., Bayer M. Nanosecond Spin Coherence Time of Nonradiative Excitons in GaAs/AlGaAs Quantum Wells// *Phys. Rev. Lett.* 2019. Vol. 122, issue. 14. P. 147401.
12. Kammann E., Liew T.C.H., Ohadi H., Cilibrizzi P., Tsotsis P., Hatzopoulos Z., Savvidis P.G., **Kavokin A.V.**, Lagoudakis P.G. Nonlinear Optical Spin Hall Effect and Long-Range Spin Transport in Polariton Lasers// *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109, issue. 3. P. 036404.
13. Lundt N., Dusanowski L., Sedov E., Stepanov P., Glazov M.M., Klemmt S., Klaas M., Beierlein J., Qin Y., Tongay S., Richard M., **Kavokin A.V.**, Hofling S., Schneider C. Optical valley Hall effect for highly valley-coherent exciton-polaritons in an atomically thin semiconductor// *Nat. Nanotechnol.* 2019. Vol. 14, issue. 8. P. 770.
14. High A.A., Hammack A.T., Leonard J.R., Yang S., Butov L.V., Ostatnicky T., Vladimirova M., **Kavokin A.V.**, Liew T.C.H., Campman K.L., Gossard A.C. Spin Currents in a Coherent Exciton Gas// *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 110, issue. 24. P. 246403.
15. Colas D., Dominici L., Donati S., Pervishko A.A., Liew T.C.H., Shelykh I.A., Ballarini D., de Giorgi M., Bramati A., Gigli G., del Valle E., Laussy F.P., **Kavokin A.V.**, Sanvitto D. Polarization shaping of Poincare beams by polariton oscillations// *Light-Sci. Appl.* 2015. Vol. 4. P. e350.

16. Sedov E.S., Rubo Y.G., Kavokin A.V. Polariton polarization rectifier// *Light-Sci. Appl.* 2019. Vol. 8. P. 79.
17. Kozin V.K., Shabashov V.A., **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A. Anomalous Exciton Hall Effect// *Phys. Rev.Lett.* 2021. Vol. 126. P. 036801.
18. Lundt N., Klemmt S., Cherotchenko E., Betzold S., Iff O., Nalitov A.V., Klaas M., Dietrich C.P., **Kavokin A.V.**, Hofling S., Schneider C. Room-temperature Tamm-plasmon exciton-polaritons with a WSe<sub>2</sub> monolayer// *Nat. Commun.* 2016. Vol. 7. P. 13328.
19. Wurdack M., Lundt N., Klaas M., Baumann V., **Kavokin A.V.**, Hofling S., Schneider C. Observation of hybrid Tamm-plasmon exciton-polaritons with GaAs quantum wells and a MoSe<sub>2</sub> monolayer// *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. P. 259.
20. Matuszewski M., Taylor T., **Kavokin A.V.** Exciton Supersolidity in Hybrid Bose-Fermi Systems// *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108, issue. 6. P. 60401.
21. Boulier T., Cancellieri E., Sangouard N.D., Glorieux Q., **Kavokin A.V.**, Whittaker D.M., Giacobino E., Bramati A. Injection of Orbital Angular Momentum and Storage of Quantized Vortices in Polariton Superfluids// *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 116, issue. 11. P. 116402.
22. Fischer J., Brodbeck S., Chernenko A.V., Lederer I., Rahimi-Iman A., Amthor M., Kulakovskii V.D., Worschech L., Kamp M., Durnev M., Schneider C., **Kavokin A.V.**, Hofling S. Anomalies of a Nonequilibrium Spinor Polariton Condensate in a Magnetic Field// *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 112, issue. 9. P. 093902.
23. Krol M., Mirek R., Stephan D., Lekenta K., Rousset J.G., Pacuski W., **Kavokin A.V.**, Matuszewski M., Szczytko J., Pietka B. Giant spin Meissner effect in a nonequilibrium exciton-polariton gas// *Phys. Rev. B.* 2019. Vol. 99, issue. 11. P. 115318.
24. Gao T., Li G., Estrecho E., Liew T.C.H., Comber-Todd D., Nalitov A., Steger M., West K., Pfeiffer L., Snoke D.W., **Kavokin A.V.**, Truscott A.G., Ostrovskaya E.A. Chiral Modes at Exceptional Points in Exciton-Polariton Quantum Fluids// *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 120, issue. 6. P. 65301.

25. Liew T.C.H., Glazov M.M., Kavokin K.V., Shelykh I.A., Kaliteevski M.A., **Kavokin A.V.** Proposal for a Bosonic Cascade Laser // *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – Vol. 110, issue. 4. – P. 047402.
26. Liew T.C.H., Rubo Y.G., Sheremet A.S., De Liberato S., Shelykh I.A., Laussy F.P., **Kavokin A.V.** Quantum statistics of bosonic cascades // *New J. Phys.* – 2016. – Vol. 18. – P. 23041.
27. Chen F., Zhou H., Li H., Cao J.H., Luo S., Sun Z., Zhang Z., Shao Z.Q., Sun F.H., Zhou B., Dong H.X., Xu H.X., **Kavokin A.V.**, Chen Z.H., Wu J. Femtosecond dynamics of polariton bosonic cascades at room temperature // *Nano Letters.* 2022. – Vol. 22, issue. 5. – P. 2023-2029.
28. **Kavokin A.V.**, Shelykh I.A., Taylor T., Glazov M.M. Vertical Cavity Surface Emitting Terahertz Laser// *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108, issue. 19. P. 197401.
29. **Kavokin A.V.**, Lagoudakis P. Exciton-polariton condensates: Exciton-mediated superconductivity // *Nat. Mater.* – 2016. – Vol. 15, issue. 6. – P. 599-600.
30. Skopelitis P., Cherotchenko E.D., **Kavokin A.V.**, Posazhennikova A. Interplay of Phonon and Exciton-Mediated Superconductivity in Hybrid Semiconductor-Superconductor Structures // *Phys. Rev. Lett.* – 2018. – Vol. 120, issue. 10. – P. 107001.
31. **Kavokin A.V.**, Galperin Y.M., Varlamov A.A. Proposed Model of the Giant Thermal Hall Effect in Two-Dimensional Superconductors: An Extension to the Superconducting Fluctuation Regime// *Phys. Rev. Lett.* 2020. Vol. 125. P. 217005.
32. Zhang L., Xie W., Wang J., Poddubny A., Lu J., Wang Y.L., Gu J., Liu W.H., Xu D., Shen X.C., Rubo Y.G., Altshuler B.L., **Kavokin A.V.**, Chen Z.H. Weak lasing in one-dimensional polariton superlattices // *PNAS.* – 2015. – Vol. 112, issue. 13. – P. 1516-1519.
33. Ohadi H., Gregory R.L., Freearde T., Rubo Y.G., **Kavokin A.V.**, Berloff N.G., Lagoudakis P.G. Nontrivial Phase Coupling in Polariton Multiplets // *Phys. Rev. X.* – 2016. – Vol. 6, issue. 3 P. 31032.

34. Nalitov A.V., Liew T.C.H., **Kavokin A.V.**, Altshuler B.L., Rubo Y.G. Spontaneous Polariton Currents in Periodic Lateral Chains // Phys. Rev. Lett. – 2017. – Vol. 119, issue. 6. – P. 67406.
35. High A.A., Leonard J.R., Hammack A.T., Fogler M.M., Butov L.V., **Kavokin A.V.**, Campman K.L., Gossard A.C. Spontaneous coherence in a cold exciton gas// Nature 2012. Vol. 483, issue. 7391. P. 584-588.
36. Andreev S.V., Varlamov A.A., **Kavokin A.V.** Scale Invariance and Universality in a Cold Gas of Indirect Excitons// Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 112, issue. 3. P. 36401.