



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G02B 5/30 (2023.01); B82Y 20/00 (2023.01)

(21)(22) Заявка: 2022118433, 06.07.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.07.2022

Дата регистрации:
15.08.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 06.07.2022

(45) Опубликовано: 15.08.2023 Бюл. № 23

Адрес для переписки:

121205, Москва, тер. инновационного центра
"Сколково", ул. Луговая, 4, ООО "ЦИС
"Сколково"

(72) Автор(ы):

Павлос Лагудакис (RU),
Барышев Степан Александрович (RU),
Гнусов Иван Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Автономная некоммерческая
образовательная организация высшего
образования "Сколковский институт науки
и технологий" (Сколковский институт науки
и технологий) (RU)

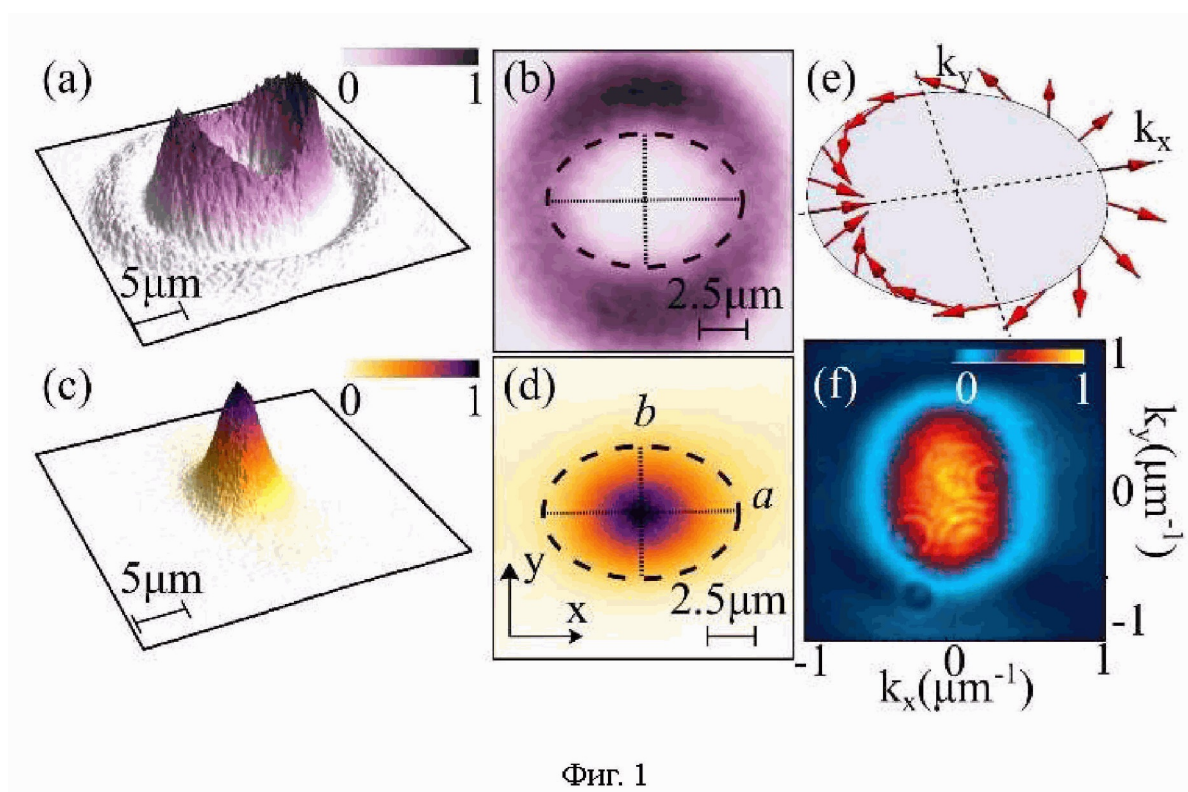
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Lagoudakis, P.G. Sawidis, J.J.
Baumberg, D.M. Whittaker, P.R. Eastham, M.S.
Skolnick, and J.S. Roberts, Stimulated spin
dynamics of polaritons in semiconductor
microcavities, Physical Review B 65, 161310
(2002). RU 2756257 C1, 28.09.2021. RU 2745206
C1, 22.03.2021. US 2019389739 A1, 26.12.2019.

(54) Способ оптического управления линейной поляризацией излучения

(57) Реферат:

Изобретение может быть использовано для точного контроля поляризации когерентных источников света, а также в спинотронике. В способе оптического управления линейной поляризацией излучения, создаваемого экситон-поляритонным конденсатом, образующимся в неорганическом полупроводниковом образце при его нерезонансном возбуждении лазерным излучением, возбуждают экситон-поляритонный конденсат лазером непрерывного действия с линейной поляризацией на длине волны, отстроенной от моды полупроводникового микрорезонатора, используемого в качестве образца, перед изменением свойств возбуждающего лазерного излучения

поляритонный конденсат возбуждают симметричным профилем пучка накачки и сканируют положение образца с целью обнаружения точки, в которой излучение указанного конденсата будет иметь степень поляризации меньше 0,2, после чего профиль возбуждения меняют на эллиптический и управляют линейной поляризацией излучения, изменяя свойства возбуждающего лазерного излучения, таких как эллиптичность профиля пучка лазера возбуждения, ориентация профиля пучка лазера возбуждения на образце, мощность лазерного возбуждения. Технический результат – возможность оптического управления линейной поляризацией излучения. 9 з.п. ф-лы, 4 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

G02B 5/30 (2023.01); B82Y 20/00 (2023.01)(21)(22) Application: **2022118433, 06.07.2022**(24) Effective date for property rights:
06.07.2022Registration date:
15.08.2023

Priority:

(22) Date of filing: **06.07.2022**(45) Date of publication: **15.08.2023 Bull. № 23**

Mail address:

**121205, Moskva, ter. innovatsionnogo tsentra
"Skolkovo", ul. Lugovaya, 4, OOO "TSIS
"Skolkovo"**

(72) Inventor(s):

**Pavlos Lagudakis (RU),
Baryshev Stepan Aleksandrovich (RU),
Gnusov Ivan Sergeevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Avtonomnaya nekommercheskaya
obrazovatel'naya organizatsiya vysshego
obrazovaniya "Skolkovskij institut nauki i
tekhnologii" (Skolkovskij institut nauki i
tekhnologii) (RU)**(54) **OPTICAL CONTROL METHOD FOR LINEAR POLARIZATION OF RADIATION**

(57) Abstract:

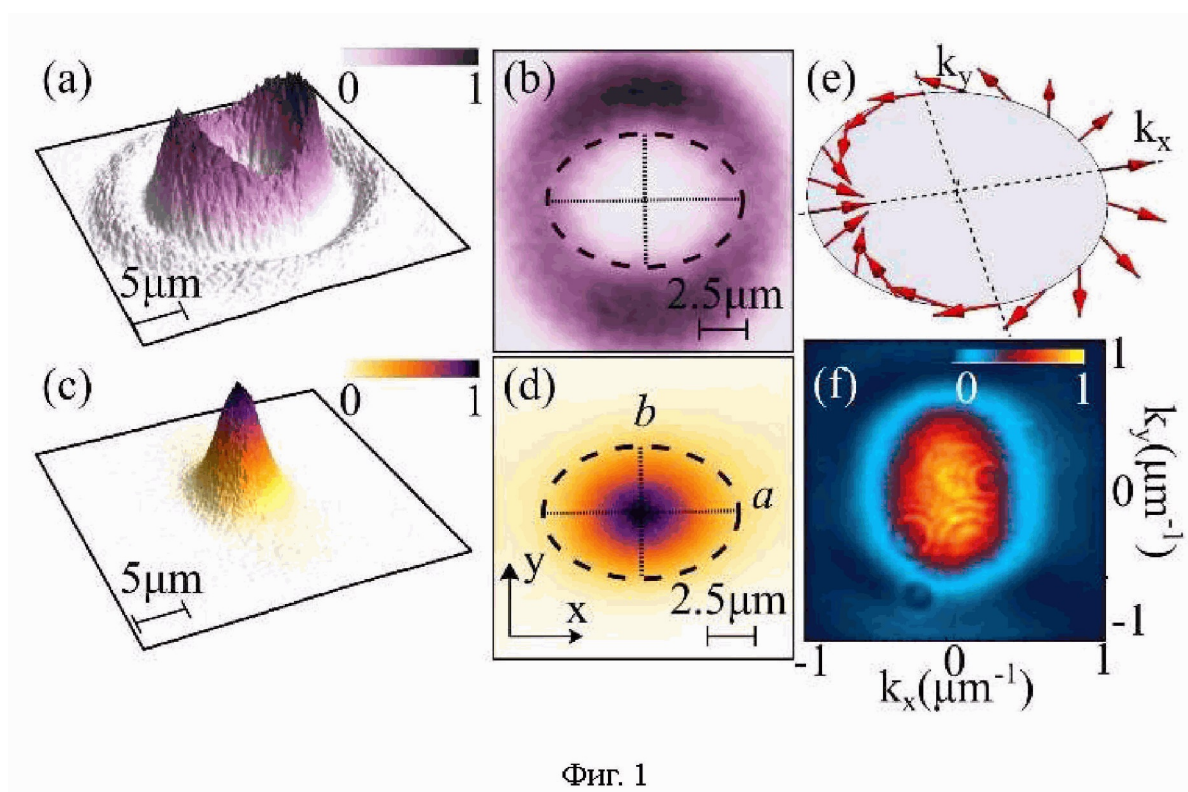
FIELD: optical equipment.

SUBSTANCE: invention can be used for precise control of polarization of coherent light sources, as well as in spinoptronics. In a method for optically controlling linear polarization of radiation produced by an exciton-polariton condensate formed in an inorganic semiconductor sample upon its nonresonant excitation by laser radiation, the exciton-polariton condensate is excited by a continuous wave laser with linear polarization at a wavelength detuned from the mode of the semiconductor microcavity used as sample, before changing the properties of the exciting laser radiation, the polariton condensate is excited with a symmetric

pump beam profile and the position of the sample is scanned in order to find the point at which the radiation of the specified condensate will have a degree of polarization less than 0.2, after which the excitation profile is changed to elliptical and the linear polarization of the radiation is controlled, changing the properties of the exciting laser radiation, such as the ellipticity of the excitation laser beam profile, the orientation of the excitation laser beam profile on the sample, the laser excitation power.

EFFECT: possibility of optical control of linear polarization of radiation.

10 cl, 4 dwg



Фиг. 1

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к способу оптического управления линейной поляризацией излучения за счет вращения плоскости поляризации на основе экситон-поляритонного конденсата в оптической ловушке эллиптической формы. Изобретение может быть
5 использовано для точного контроля поляризации когерентных источников света а также в спинотронике.

Предпосылки создания изобретения

Во многих оптических технологиях, таких как передача данных или зондирование, требуется точный контроль поляризации когерентных источников света. Известные
10 способы управления поляризацией света для преобразования одного вида поляризации в другой, например линейной в эллиптическую или круговую, основаны, в частности, на эффекте двулучепреломления в анизотропных средах. Изменение разности фаз $\Delta\varphi$ между обыкновенным и необыкновенным лучами и азимутального угла α позволяют с высокой точностью преобразовывать линейную поляризацию в эллиптическую или
15 круговую и обратно. Чтобы создавать или управлять поляризацией света, существуют поляризационные приборы: полу- и четверть - волновые пластинки, модуляторы поляризации, поляризаторы, призмы. Однако проблемой остается конечная скорость изменения поляризации - механические поляризационные приборы не способны работать на высоких гигагерцовых частотах.

Однако, существуют системы способные оперировать на гораздо больших частотах, например поляритонные конденсаты в неорганическом полупроводниковом
микрорезанторе. Управление поляризацией поляритонного конденсата возможно, например, путем создания затравочной поляризации внешними поляризованными лазерами, настроенными в резонанс с энергией поляритонов (Lagoudakis, P.G. Sawidis,
25 J.J. Baumberg, D.M. Whittaker, P.R. Eastham, M.S. Skolnick, and J.S. Roberts, Stimulated spin dynamics of polaritons in semiconductor microcavities, Physical Review B 65, 161310 (2002)). Однако, для практических устройств спинотроники гораздо больший интерес представляют схемы нерезонансного возбуждения, позволяющие управлять поляризацией поляритонного конденсата примерно таким же образом, как в
30 поверхностно-излучающих лазерах с вертикальным резонатором (VCSEL) (J.M. Ostermann and R. Michalzik, Polarization control of VCSELs; VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, edited by R. Michalzik (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013) pp. 147-179)

При нерезонансном возбуждении в неорганических полупроводниковых
35 микрорезонаторах передача поляризации (спина) от лазера накачки возможна напрямую. Это происходит за счет создания несбалансированной по спину активной среды для циркулярно поляризованных поляритонов (иными словами, оптической ориентации экситонов) с помощью эллиптически поляризованного пучка. Такой подход позволяет создавать поляритонные конденсаты с высокой степенью круговой поляризации,
40 определяемой накачкой. Однако, в неорганических образцах линейно поляризованные поляритонные моды конденсата испытывают изотропное усиление, что делает невозможным управление линейной поляризацией конденсата, за исключением таких подходов, как наведенное двулучепреломление за счет деформации материала резонатора или путем создания резонаторов специфической формы.

До сих пор не было показано такой системы, которая позволила бы полностью контролировать линейные поляризационные степени свободы в поляритонном конденсате только за счет свойств лазера накачки.

Настоящее изобретение посвящено решению всех перечисленных выше проблем.

Суть изобретения

Технической проблемой настоящего изобретения является разработка способа оптического управления линейной поляризацией излучения, создаваемого экситон-поляритонным конденсатом, образующемся в неорганическом полупроводниковом образце.

Технический результат настоящего изобретения совпадает с поставленной задачей.

Технический результат настоящего изобретения обеспечивается за счет того, что разработан способ оптического управления линейной поляризацией излучения, создаваемого экситон-поляритонным конденсатом, образующимся в неорганическом полупроводниковом образце при его нерезонансном возбуждении лазерным излучением, заключается в изменении свойств возбуждающего лазерного излучения, таких как: эллиптичность профиля пучка лазера возбуждения, ориентация профиля пучка лазера возбуждения на образце, мощность лазерного возбуждения.

Поперечный профиль пучка лазера возбуждения представляет собой эллипс.

Вращение профиля пучка лазера возбуждения, а также изменение его эллиптичности осуществляют с помощью пространственного модулятора света при помощи численного алгоритма.

В качестве образца используется полупроводниковый микрорезонатор 2λ GaAs/AlAs_{0,98}P_{0,02} с квантовыми ямами из InGaAs.

Образец помещается в криостат и охлаждается до криогенных температур (4K).

Экситон поляритонный конденсат в образце возбуждается лазером непрерывного действия с линейной поляризацией на длине волны, отстроенной от моды полупроводникового микрорезонатора, используемого в качестве образца.

Перед изменением свойств возбуждающего лазерного излучения поляритонный конденсат возбуждают симметричным профилем пучка лазера возбуждения и сканируют положение образца с целью обнаружения точки, в которой излучение указанного конденсата будет иметь степень поляризации меньше 0.2, после чего профиль возбуждения меняют на эллиптический.

При нерезонансном лазерном возбуждении образца профилем пучка лазера возбуждения эллиптической формы, линейная поляризация излучения конденсата становится ориентированной вдоль короткой оси эллипса профиля пучка лазера возбуждения.

При вращении профиля пучка лазера возбуждения в плоскости образца, линейная поляризация излучения конденсата определяется пространственной ориентацией профиля пучка лазера возбуждения на образце.

Скорость вращения линейной поляризации излучения конденсата определяется быстроедействием пространственного модулятора света.

При увеличении мощности лазера возбуждения линейная поляризация излучения конденсата поворачивается.

При изменении эллиптичности профиля пучка лазера возбуждения, то есть, отношения большой и малой осей эллипса профиля пучка лазера возбуждения, меняется степень линейной поляризации излучения конденсата, в частности, растет для большей эллиптичности профиля возбуждения.

Настоящее изобретение основано на управлении и возможности вращения плоскости линейной поляризации излучения экситон-поляритонного конденсата при его возбуждении профилем пучка лазера возбуждения эллиптической формы.

Краткое описание чертежей Прилагаемые чертежи, которые включены в состав настоящего описания и являются его частью, иллюстрируют варианты осуществления

изобретения и совместно с вышеприведенным общим описанием изобретения и нижеприведенным подробным описанием вариантов осуществления служат для пояснения принципов настоящего изобретения.

5 Фиг. 1 - Пространственные профили фотолюминесценции (ФЛ для пучка лазера возбуждения (a, b) и поляритонного конденсата (c, d). Профилем пучка лазера возбуждения для поляритонов создается ловушка с большой (главной) и малой полуосями, обозначенными a и b, соответственно, (e) Распределение эффективного магнитного поля $\Omega(k)$ в плоскости в пространстве импульсов (красные стрелки) при расщеплении поперечных электрических и магнитных мод, заданном уравнением (3).
10 (f) Распределение импульса поляритонного конденсата в плоскости. Диаграммы (c, d, f) соответствуют возбуждению поляритонного конденсата в два раза выше его порога конденсации (т.е. $P=2P_{th}$). k_x, k_y (мкм^{-1}) соответствуют пространственным проекциям волнового вектора на ось x и y, соответственно.

15 Фиг. 2 - Зависимость параметров Стокса $S_{1,2,3}$ поляритонного конденсата от мощности возбуждения (черные точки - вертикальная/горизонтальная поляризация, S_1 , красные - диагональная поляризация, S_2 ; синие - круговая поляризация, S_3): (a) симметричного кольцевого профиля пучка лазера возбуждения с результирующим цилиндрически симметричным профилем поляритонного конденсата; (b) для ловушки эллиптической формы, созданной профилем пучка лазера возбуждения и поляритонного конденсата с главной осью, ориентированной под углом 90° , (c) 45° и (d) 0° . Ориентация главной оси поляритонного конденсата (ловушки) показана черными стрелками. Конденсация во всех случаях была преимущественно одномодовой, т.е. состояние было близким к стационарному.

25 Фиг. 3 - (a) Параметры Стокса конденсата (S_1 черный, S_2 красный, S_3 синий) для различных ориентаций главной оси конденсата в реальном пространстве (вставки) при $P=1.94P_{th}$. Главная ось конденсата показана черными стрелками. (b) Параметры S_1 и (c) S_2 для разных мощностей накачки и ориентаций ловушки.

30 Фиг. 4 - Зависимость поляризации излучения конденсата от эллиптичности профиля пучка лазера возбуждения. Черные и красные точки обозначают параметры Стокса S_1 и S_2 соответственно. Зеленые точки обозначают степень поляризации конденсата ($DOP = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$).

35 Термины и определения

Для лучшего понимания настоящего изобретения ниже приведены некоторые термины, использованные в настоящем описании изобретения. Если не определено отдельно, технические и научные термины в данной заявке имеют стандартные значения, общепринятые в научной и технической литературе.

40 В настоящем описании и в формуле изобретения термины «включает», «включающий» и «включает в себя», «имеющий», «снабженный», «содержащий» и другие их грамматические формы не предназначены для истолкования в исключительном смысле, а, напротив, используются в неисключительном смысле (т.е., в смысле «имеющий в своем составе»). В качестве исчерпывающего перечня следует рассматривать только выражения типа «состоящий из».

45 В настоящем описании и в формуле «поляритон», «экситон-поляторон» является квазичастицей, представляющей собой квантовую суперпозицию фотонной и экситонной компонент в твердом теле. Они возникают в режиме сильной связи между экситонами и фотонами в полупроводниковых микрорезонаторах. Будучи составными бозонами,

они могут претерпевать при изменении мощности накачки неравновесный фазовый переход в высококогерентное многочастичное состояние, называемое поляритонным конденсатом. Важной характеристикой этих частиц является проекция их спина ($\pm\hbar$) на направление кристаллической оси резонатора, которая легко может быть определена

путем измерения поляризации фотолюминесценции (ФЛ) поляритонов.

Термин «экситон поляритонный конденсат», «поляритонный конденсат» означает высококогерентное многочастичное неравновесное фазовое состояние поляритонов, возникающее при увеличении мощности возбуждающего лазерного излучения.

Термин «соединенный» означает функционально соединенный, при этом может быть использовано любое количество или комбинация промежуточных элементов между соединяемыми компонентами (включая отсутствие промежуточных элементов).

Кроме того, термины «первый», «второй», «третий» и т.д. используются просто как условные маркеры, не накладывая каких-либо численных или иных ограничений на перечисляемые объекты.

Подробное описание изобретения

Для создания линейной поляризации излучения на образце - неорганическом микрорезонаторе 2λ GaAs/AlAs_{0,98}P_{0,02} с квантовыми ямами на основе InGaAs, образец помещают в криостат, в котором поддерживается температура 4 К.

Затем образец возбуждался нерезонансным лазером непрерывного действия с линейной поляризацией. Длина волны возбуждения ($\lambda=783,6$ нм) соответствовала минимуму отражения микрорезонатора. Указанная температура в криостате обеспечивала уменьшение нагрева образца при воздействии на него лазера.

Возбуждающий лазерный пучок модулировался акустооптическим модулятором так, чтобы формировались прямоугольные импульсы длительностью 10 мкс с частотой повторения 1 кГц. Отстройка экситонной моды и моды резонатора составляла -3 мэВ.

Затем отражающий жидкокристаллический пространственный модулятор света (SLM) преобразовывал профиль пучка лазера возбуждения в пучок с сечением эллиптической формы (см. Фиг. 1(a) и пунктирный эллипс на Фиг. 1(b)).

Сформированный пучок лазера возбуждения с сечением эллиптической формы попадает на образец, образуя поляритонный конденсат. Конденсат возбуждается лазером непрерывного действия с линейной поляризацией на длине волны, отстроенной от моды полупроводникового микрорезонатора.

Для определения подходящей точки на образце изначально сканируют положение образца, используя симметричный профиль пучка лазера возбуждения, с целью обнаружения точки, в которой излучение указанного конденсата будет иметь степень поляризации меньше 0.2 (Фиг. 1(a)).

В зависимости от созданного профиля пучка лазера возбуждения с помощью указанного модулятора, на образце формируется оптическая ловушка для поляритонного конденсата, форма которой представлена на Фиг. 1. Форма ловушки определяет пространственную форму конденсата, представленную на Фиг. 2b-d.

Далее изучаются характеристики излучения, созданного поляритонным конденсатом, при этом определяют: интенсивность излучения конденсата (определяется с помощью камеры), энергию и импульс излучения (с помощью спектрометра), поляризацию света (спин-поляритонов) с помощью поляриметра.

Как известно, поляритоны образуются при прохождении света через структуру, содержащую среду, способную создавать экситоны, и расположенную между двумя зеркалами, находящимися на расстоянии, соответствующем длине волны проходящего света. Экситоны связываются со светом, и в результате взаимодействия фотонов и

экситонов образуются новые квазичастицы - поляритоны, у которых меняется дисперсия и свойства по сравнению с экситоном и фотоном по отдельности. Поляритоны обладают сильными нелинейностями, у них малое время жизни, малая эффективная масса и большая скорость распространения. Они являются бозонами и способны занимать
 5 одно состояние, образуя поляритонный конденсат. Поляритонный конденсат имеет одну волновую функцию, т.е. одну энергию, один спин. За конечное время поляритон распадается на фотон и экситон. С помощью вновь образованного фотона (несет информацию о поляритоне) можно охарактеризовать поляритоны (импульс, энергию и др.).

10 В процессе экспериментов было выявлено, что поляризация поляритонного конденсата зависит от формы оптической ловушки, создаваемой профилем пучка лазера возбуждения, и ориентирована вдоль короткой оси эллипса такой ловушки.

Поляритонный конденсат можно описать параметром порядка, записанным в каноническом базисе со спинами вверх и вниз $\Psi = (\psi_+, \psi_-)^T$, где ψ_+ и ψ_- это проекции
 15 волновой функции поляритонного конденсата на состояния со спином вверх и вниз соответственно. Тогда спиновое состояние поляритонного конденсата можно представить как вектор (псевдоспин) на сфере Пуанкаре, соответствующий вектору Стокса (поляризации) излучаемого света $\mathbf{S} = (S_1, S_2, S_3)^T = (\Psi^\dagger \hat{\sigma} \Psi) / (\Psi^\dagger \Psi)$, где $\hat{\sigma}$ - матричный
 20 вектор Паули, S_1, S_2, S_3 это параметры Стокса, характеризующие различные проекции поляризации изучаемого излучения. ФЛ была проанализирована в представлении усредненных во времени стоксовых компонент, записанных в виде:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{I_H - I_V}{I_H + I_V}, \\
 S_2 &= \frac{I_D - I_A}{I_D + I_A}, \\
 S_3 &= \frac{I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}}{I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-}},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

30 где $I_{H,V,D,A,\sigma^+,\sigma^-}$ - усредненные во времени интенсивности проекций излучаемого света с линейной горизонтальной, вертикальной, диагональной, антидиагональной, правой и левой круговой поляризациями.

Оптическая ловушка для поляритонов реализуется за счет сильного отталкивания
 35 поляритонов, окруженных фоновым облаком некогерентных порожденных лазерным излучением экситонов, которые в формализме среднего поля создают отталкивающий потенциал для поляритонов, одновременно обеспечивая активную среду для поляритонного конденсата.

Такой способ создания оптической ловушки обладает преимуществом минимального
 40 перекрытия между поляритонным конденсатом и несконденсированными экситонами, что сводит к минимуму эффекты дефазировки. Путем сканирования места возбуждения на образце лазерным возбуждением с кольцевым профилем определяется место с малой степенью поляризации излучения конденсата $\text{DOP} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ (Фиг. 2а). Малые
 45 значения $S_{1,2}$ означают, что основное состояние ловушки вырождено по спину, так что случайная линейная поляризация возникает в каждой реализации поляритонного конденсата, усредняясь по многим импульсам, дает низкие значения линейных стоксовых компонент. Значение S_3 близкое к нулю подтверждает, что используемое лазерное

возбуждение (в значительной степени) линейно поляризовано и не нарушает спиновую симметрию системы.

Неоднородное распределение интенсивности в профиле пучка лазера возбуждения (Фиг. 1a, b) приводит к образованию оптической ловушки эллиптической формы, обозначенной пунктирным эллипсом, которая ограничивает поляритонный конденсат, как показано на Фиг. 1 (d). В результате наблюдается резкий рост значения компонент линейной поляризации поляритонного конденсата выше $1,2P_{th}$ при том же положении образца. При этом направление линейной поляризации излучения совпадает с ориентацией малой оси ловушки, т.е. малой оси профиля пучка лазера возбуждения. В частности, для вертикально вытянутого поляритонного конденсата на Фиг. 2b, созданного при возбуждении образца лазером возбуждения с вертикальным профилем, наблюдается горизонтальная линейная поляризация (увеличение стоксовой компоненты S_1 - черная кривая). Такой же эффект наблюдается для поляритонных конденсатов, вытянутых по горизонтали и диагонали на Фиг. 2c, d, а именно при возбуждении образца лазером с горизонтальным профилем пучка накачки наблюдается вертикальная линейная поляризация (Фиг. 2d, увеличение стоксовой компоненты S_1 - черная кривая), а при возбуждении образца лазером с профилем пучка накачки, расположенным под углом 45° , наблюдается линейная поляризация (Фиг. 2c), ориентированная антидиагонально.

Вращая профиль возбуждающего пучка лазера с помощью пространственного модулятора света (SLM), мы можем создать любую желаемую линейную поляризацию в конденсате. На Фиг. 3a представлены измеренные компоненты поляризации излучения конденсата в зависимости от угла поворота главной оси конденсата. Нетрудно заметить непрерывный поворот плоскости поляризации конденсата вблизи экваториальной плоскости сферы Пуанкаре вслед за поворотом оптической ловушки. Были протестированы также и другие геометрические конструкции эллиптического профиля возбуждения, приводящие к такому же результату.

При изменении мощности линейная поляризация излучения конденсата поворачивается, а именно испытывает поворот на 30 градусов при изменении мощности от 1.2 до 2.2 единиц порога (P/P_{th}). На Фиг. 3b, c показаны зависимости параметров Стокса $S_{1,2}$ от мощности возбуждения при разных ориентациях большой оси оптической ловушки. Можно связать этот эффект с увеличением числа частиц конденсата (иными словами, с ростом нелинейных эффектов) в сочетании с небольшой поляризационной эллиптичностью лазера возбуждения, создающей несбалансированный по спину потенциал ловушки и активную среду.

При изменении эллиптичности профиля пучка лазера возбуждения, т.е. изменении отношения большой и малой полуосей эллипса профиля пучка лазера возбуждения, меняется степень линейной поляризации излучения и ее направление. Так, на Фиг. 4 при изменении эллиптичности конденсата от 0.7 до 1.3 , то есть от вертикально вытянутого эллипса до горизонтально, поляризация излучения конденсата меняется от горизонтальной до вертикальной соответственно. Степень поляризации (DOP), и, в частности, степень линейной поляризации, при этом максимальна для значений эллиптичности более отличных от единицы и достигает минимума вблизи последней, когда профиль возбуждения является симметричным.

Экспериментальные результаты можно интерпретировать исходя из расщепления поперечных электрических и магнитных мод поляритонов в оптической ловушке, которое при нарушении цилиндрической симметрии ловушки $V(r)$ приводит к появлению

тонкой структуры поперечных мод ловушки. Такое расщепление формирует состояние с определенной поляризацией, в которое и конденсируются поляритоны. В не взаимодействующем (линейном) режиме поляритоны описываются следующим гамильтонианом:

$$\hat{H} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} - \hat{\sigma} \cdot \Omega + V(r) - \frac{i\hbar\Gamma}{2}, \quad 2$$

где m - масса поляритона, $k=(k_x, k_y)$ - импульс резонатора в плоскости, Γ^{-1} - время жизни поляритона, и

$$\Omega = \hbar^2 \Delta \begin{pmatrix} k_x^2 - k_y^2 \\ 2k_x k_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad 3$$

- эффективное магнитное поле (см. Фиг. 1е), возникающее в результате расщепления поперечных электрических и магнитных мод величиной Δ . В рассматриваемом случае эллиптической ловушки, которую для простоты будем считать гармонической, расщепление поперечных электрических и магнитных мод создает эффективное магнитное поле, действующее на псевдоспин поляритона и расщепляющее спиновые уровни ловушки. Для низшего (основного) гармонического состояния, в которое и собирается наибольшая часть поляритонов, это поле можно записать следующим образом:

$$\Omega_{trap} = \frac{\hbar m \Delta \delta \omega}{2} \begin{pmatrix} \cos(2\theta_{min}) \\ \sin(2\theta_{min}) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad 4$$

Здесь θ_{min} - угол между малой осью ловушки и горизонталью, а $\delta\omega=|\omega_x-\omega_y|\propto|a^{-1}-b^{-1}|$ - абсолютная разность частот ловушки вдоль главной оси a и малой оси b (см. Фиг. 1d). Понятно, что для симметричной ловушки $\delta\omega=0$ и поле исчезает. Отметим, что в описанном выше экспериментальном резонаторе $\Delta < 0$.

Направление эффективного магнитного поля контролируется углом эллиптической ловушки θ_{min} , которая тем самым поворачивает и псевдоспин конденсата в экваториальной плоскости сферы Пуанкаре. Это вызывает плавное изменение стоксовых компонент излучаемого света $S_{1,2}$ по мере вращения ловушки, как показано на Фиг. 3.

Таким образом, результаты экспериментов показали возможность управления линейной поляризацией излучения за счет пространственной ориентации эллиптического профиля пучка лазера возбуждения (Фиг. 2b-d, 3а), изменения мощности возбуждающего лазерного излучения (Фиг. 3с-d), а также его эллиптичности профиля пучка лазера возбуждения (Фиг. 4). Малое время жизни и высокая скорость поляритонов потенциально позволит управлять линейной поляризацией излучения в диапазоне гигагерцовых частот.

Хотя настоящая патентная заявка относится к определенному в прилагаемой ниже формуле изобретения, важно отметить, что настоящая заявка на патент содержит основание для формулировки других изобретений, которые могут, например, быть заявлены как объект уточненной формулы изобретения настоящей заявки или как объект формулы изобретения в выделенной и/или продолжающей заявке. Такой объект может быть охарактеризован любым признаком или комбинацией признаков, описанных в настоящем документе.

Литература:

[1] A. Kavokin, J.J. Baumberg, G. Malpuech, and F.P. Laussy, *Microcavities* (OUP Oxford, 2007).

[2] J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J.M.J. Keeling, F.M. Marchetti, M.H. Szymahska, R. Andre, J.L. Staehli, V. Savona, P.B. Littlewood, B. Deveaud, and L.S. Dang, Bose-Einstein condensation of exciton polaritons., *Nature* 443, 409 (2006).

[3] L. Pickup, K. Kalinin, A. Askitopoulos, Z. Hatzopoulos, P. Sawidis, N. Berloff, and P. Lagoudakis, Optical Bistability under Nonresonant Excitation in Spinor Polariton Condensates, *Physical Review Letters* 120, 225301 (2018).

[4] Y. del Valle-Inclan Redondo, H. Sigurdsson, H. Ohadi, I.A. Shelykh, Y.G. Rubo, Z. Hatzopoulos, P.G. Sawidis, and J.J. Baumberg, Observation of inversion, hysteresis, and collapse of spin in optically trapped polariton condensates, *Physical Review B* 99, 165311 (2019).

[5] H. Sigurdsson, Hysteresis in linearly polarized nonresonantly driven exciton-polariton condensates, *Physical Review Research* 2, 023323 (2020).

[6] T.K. Paraïso, M. Wouters, Y. Leger, F. Morier-Genoud, and B. Deveaud-Plédran, Multistability of a coherent spin ensemble in a semiconductor microcavity, *Nature Materials* 9, 655 (2010).

[7] A. Amo, T.C.H. Liew, C. Adrados, R. Houdre, E. Giacobino, A.V. Kavokin, and A. Bramati, Excitonpolariton spin switches, *Nature Photonics* 4, 361 (2010).

[8] R. Cerna, Y. Leger, T.K. Paraïso, M. Wouters, F. Morier-Genoud, M.T. Portella-Oberli, and B. Deveaud, Ultrafast tristable spin memory of a coherent polariton gas, *Nature Communications* 4, 2008 (2013).

[9] P. Cilibrizzi, H. Sigurdsson, T.C.H. Liew, H. Ohadi, S. Wilkinson, A. Askitopoulos, I.A. Shelykh, and P.G. Lagoudakis, Polariton spin whirls, *Physical Review B* 92, 155308 (2015).

[10] A. Kavokin, G. Malpuech, and M. Glazov, Optical spin hall effect, *Phys. Rev. Lett.* 95, 136601 (2005).

[11] C. Leyder, M. Romanelli, J.P. Karr, E. Giacobino, T.C.H. Liew, M.M. Glazov, A.V. Kavokin, G. Malpuech, and A. Bramati, Observation of the optical spin Hall effect, *Nature Physics* 3, 628 (2007).

[12] C. Anton, S. Morina, T. Gao, P.S. Eldridge, T.C.H. Liew, M.D. Martin, Z. Hatzopoulos, P.G. Sawidis, I.A. Shelykh, and L. Viña, Optical control of spin textures in quasi-one-dimensional polariton condensates, *Phys. Rev. B* 91, 075305 (2015).

[13] R. Hivet, H. Flayac, D.D. Solnyshkov, D. Tanese, T. Boulier, D. Andreoli, E. Giacobino, J. Bloch, A. Bramati, G. Malpuech, and A. Amo, Half-solitons in a polariton quantum fluid behave like magnetic monopoles, *Nature Physics* 8, 724 (2012).

[14] M. Sich, L.E. Tapia-Rodriguez, H. Sigurdsson, P.M. Walker, E. Clarke, I.A. Shelykh, B. Royall, E.S. Sedov, A.V. Kavokin, D.V. Skryabin, M.S. Skolnick, and D.N. Krizhanovskii, Spin domains in one-dimensional conservative polariton solitons, *ACS Photonics* 5, 5095 (2018).

[15] P. Cilibrizzi, H. Sigurdsson, T.C.H. Liew, H. Ohadi, A. Askitopoulos, S. Brodbeck, C. Schneider, I.A. Shelykh, S. Höfling, J. Ruostekoski, and P. Lagoudakis, Half-skyrmion spin textures in polariton microcavities, *Physical Review B* 94, 045315 (2016).

[16] K.G. Lagoudakis, T. Ostatnický, A.V. Kavokin, Y.G. Rubo, R. Andre, and B. Deveaud-Plédran, Observation of half-quantum vortices in an exciton-polariton condensate, *Science* 326, 974 (2009).

[17] S. Donati, L. Dominici, G. Dagvadorj, D. Ballarini, M. De Giorgi, A. Bramati, G. Gigli, Y.G. Rubo, M.H. Szymaniska, and D. Sanvitto, Twist of generalized skyrmions and spin vortices in a polariton superfluid, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 14926 (2016).

[18] H. Ohadi, A. Dreismann, Y. Rubo, F. Pinsker, Y. del Valle-Inclan Redondo, S. Tsintzos,

Z. Hatzopoulos, P. Sawidis, and J. Baumberg, Spontaneous Spin Bifurcations and Ferromagnetic Phase Transitions in a Spinor Exciton-Polariton Condensate, *Physical Review X* 5, 031002 (2015).

[19] O. Bleu, D.D. Solnyshkov, and G. Malpuech, Interacting quantum fluid in a polariton chern insulator, *Phys. Rev. B* 93, 085438 (2016).

[20] H. Sigurdsson, G. Li, and T.C.H. Liew, Spontaneous and superfluid chiral edge states in exciton-polariton condensates, *Phys. Rev. B* 96, 115453 (2017).

[21] H. Sigurdsson, Y.S. Krivosenko, I.V. Iorsh, I.A. Shelykh, and A.V. Nalitov, Spontaneous topological transitions in a honeycomb lattice of exciton-polariton condensates due to spin bifurcations, *Phys. Rev. B* 100, 235444 (2019).

[22] I.A. Shelykh, A.V. Kavokin, Y.G. Rubo, T.C.H. Liew, and G. Malpuech, Polariton polarization-sensitive phenomena in planar semiconductor microcavities, *Semiconductor Science and Technology* 25, 013001 (2009).

[23] T. Liew, I. Shelykh, and G. Malpuech, Polaritonic devices, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 43, 1543 (2011).

[24] T. Gao, C. Anton, T.C.H. Liew, M.D. Martin, Z. Hatzopoulos, L. Vina, P.S. Eldridge, and P.G. Sawidis, Spin selective filtering of polariton condensate flow, *Applied Physics Letters* 107, 011106 (2015).

[25] A. Askitopoulos, K. Kalinin, T.C.H. Liew, P. Cilibrizzi, Z. Hatzopoulos, P.G. Sawidis, N.G. Berloff, and P.G. Lagoudakis, Nonresonant optical control of a spinor polariton condensate, *Physical Review B* 93, 205307 (2016).

[26] A. Dreismann, H. Ohadi, Y. del Valle-Inclan Redondo, R. Balili, Y.G. Rubo, S.I. Tsintzos, G. Deligeorgis, Z. Hatzopoulos, P.G. Sawidis, and J.J. Baumberg, A sub-femtojoule electrical spin-switch based on optically trapped polariton condensates, *Nature Materials* 15, 1074 (2016).

[27] A. Askitopoulos, A.V. Nalitov, E.S. Sedov, L. Pickup, E.D. Cherotchenko, Z. Hatzopoulos, P.G. Sawidis, A.V. Kavokin, and P.G. Lagoudakis, All-optical quantum fluid spin beam splitter, *Physical Review B* 97, 235303 (2018).

[28] E.S. Sedov, Y. G. Rubo, and A.V. Kavokin, Polariton polarization rectifier, *Light: Science & Applications* 8, 1 (2019).

[29] S. Mandal, R. Banerjee, E.A. Ostrovskaya, and T.C.H. Liew, Nonreciprocal transport of exciton polaritons in a non-hermitian chain, *Physical Review Letters* 125, 123902 (2020).

[30] P.G. Lagoudakis, P.G. Sawidis, J. J. Baumberg, D.M. Whittaker, P.R. Eastham, M.S. Skolnick, and J.S. Roberts, Stimulated spin dynamics of polaritons in semiconductor microcavities, *Physical Review B* 65, 161310 (2002).

[31] J.M. Ostermann and R. Michalzik, Polarization control of vcsels, in *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, edited by R. Michalzik (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013) pp. 147-179.

[32] I. Gnusov, H. Sigurdsson, S. Baryshev, T. Ermatorov, A. Askitopoulos, and P.G. Lagoudakis, Optical orientation, polarization pinning, and depolarization dynamics in optically confined polariton condensates, *Physical Review B* 102, 125419 (2020).

[33] H. Ohadi, E. Kammann, T.C.H. Liew, K.G. Lagoudakis, A.V. Kavokin, and P.G. Lagoudakis, Spontaneous Symmetry Breaking in a Polariton and Photon Laser, *Physical Review Letters* 109, 016404 (2012).

[34] J.J. Baumberg, A.V. Kavokin, S. Christopoulos, A.J.D. Grundy, R. Butte, G. Christmann, D.D. Solnyshkov, G. Malpuech, G. Baldassarri Höger von Hoyersthal, E. Feltin, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Spontaneous Polarization Buildup in a Room-Temperature Polariton Laser, *Physical Review Letters* 101, 136409 (2008).

[35] M.D. Martin, D. Ballarini, A. Amo, L. Kłopotowski, L. Vina, A.V. Kavokin, and R. Andre, Striking dynamics of ii-vi microcavity polaritons after linearly polarized excitation, *physica status*

solidi (c) 2, 3880 (2005).

[36] L. Kłopotowski, M. Martin, A. Amo, L. Vina, I. Shelykh, M. Glazov, G. Malpuech, A. Kavokin, and R. Andre, Optical anisotropy and pinning of the linear polarization of light in semiconductor microcavities, *Solid State Communications* 139, 511 (2006).

[37] J. Kasprzak, R. Andre, L.S. Dang, I.A. Shelykh, A.V. Kavokin, Y.G. Rubo, K.V. Kavokin, and G. Malpuech, Build up and pinning of linear polarization in the Bose condensates of exciton polaritons, *Physical Review B* 75, 045326 (2007).

[38] R. Balili, V. Hartwell, D. Snoke, L. Pfeiffer, and K. West, Bose-Einstein Condensation of Microcavity Polaritons in a Trap, *Science* 316, 1007 (2007).

[39] D. Read, T.C.H. Liew, Y.G. Rubo, and A.V. Kavokin, Stochastic polarization formation in exciton-polariton bose-einstein condensates, *Physical Review B* 80, 195309 (2009).

[40] B. Gayral, J.M. Gerard, B. Legrand, E. Costard, and V. Thierry-Mieg, Optical study of GaAs/AlAs pillar microcavities with elliptical cross section, *Applied Physics Letters* 72, 1421 (1998).

[41] S. Gerhardt, M. Deppisch, S. Betzold, T.H. Harder, T.C.H. Liew, A. Predojević, S. Höfling, and C. Schneider, Polarization-dependent light-matter coupling and highly indistinguishable resonant fluorescence photons from quantum dot-micropillar cavities with elliptical cross section, *Physical Review B* 100, 115305 (2019).

[42] A. Daraei, D. Sanvitto, J.A. Timpson, A.M. Fox, D. M. Whittaker, M.S. Skolnick, P.S.S. Guimaraes, H. Vinck, A. Tahraoui, P.W. Fry, S.L. Liew, and M. Hopkinson, Control of polarization and mode mapping of small volume high q micropillars, *Journal of Applied Physics* 102, 043105 (2007).

[43] M. Klaas, O.A. Egorov, T.C.H. Liew, A. Nalitov, V. Marković, H. Suchomel, T.H. Harder, S. Betzold, E.A. Ostrovskaya, A. Kavokin, S. Klemmt, S. Höfling, and C. Schneider, Nonresonant spin selection methods and polarization control in exciton-polariton condensates, *Physical Review B* 99, 115303 (2019).

[44] J. Plumhof, T. Stöferle, L. Mai, U. Scherf, and R. Mahrt, Room-temperature bose-einstein condensation of cavity exciton-polaritons in a polymer, *Nature materials* 13 (2013).

[45] T. Yagafarov, D. Sannikov, A. Zasedatelev, K. Geor-giou, A. Baranikov, O. Kyriienko, I. Shelykh, L. Gai, Z. Shen, D. Lidzey, and P. Lagoudakis, Mechanisms of blueshifts in organic polariton condensates, *Communications Physics* 3, 18 (2020).

[46] G. Panzarini, L.C. Andreani, A. Armitage, D. Baxter, M.S. Skolnick, V.N. Astratov, J.S. Roberts, A.V. Kavokin, M.R. Vladimirova, and M. A. Kaliteevski, Exciton-light coupling in single and coupled semiconductor microcavities: Polariton dispersion and polarization splitting, *Phys. Rev. B* 59, 5082 (1999).

[47] P. Cilibrizzi, A. Askitopoulos, M. Silva, F. Basti-man, E. Clarke, J.M. Zajac, W. Langbein, and P.G. Lagoudakis, Polariton condensation in a strain-compensated planar microcavity with InGaAs quantum wells, *Applied Physics Letters* 105, 191118 (2014).

[48] K.V. Kavokin, I.A. Shelykh, A.V. Kavokin, G. Malpuech, and P. Bigenwald, Quantum theory of spin dynamics of exciton-polaritons in microcavities, *Physical Review Letters* 92, 017401 (2004).

[49] A. Askitopoulos, H. Ohadi, A.V. Kavokin, Z. Hatzopoulos, P.G. Sawidis, and P.G. Lagoudakis, Polariton condensation in an optically induced two-dimensional potential, *Physical Review B* 88, 041308 (2013).

[50] M. Maragkou, C.E. Richards, T. Ostatnický, A.J.D. Grundy, J. Zajac, M. Hugues, W. Langbein, and P.G. Lagoudakis, Optical analogue of the spin hall effect in a photonic cavity, *Opt. Lett.* 36, 1095 (2011).

[51] E. Estrecho, T. Gao, N. Bobrovska, M.D. Fraser, M. Ste-ger, L. Pfeiffer, K. West, T.C.H. Liew, M. Matuszewski, D.W. Snoke, A.G. Truscott, and E.A. Ostrovskaya, Single-shot

condensation of exciton polaritons and the hole burning effect, Nature Communications 9, 2944 (2018).

[52] M. Maragkou, A.J.D. Grundy, E. Wertz, A. Lemaître, I. Sagnes, P. Senellart, J. Bloch, and P.G. Lagoudakis, Spontaneous nonground state polariton condensation in pillar microcavities, Phys. Rev. B 81, 081307 (2010).

[53] Y.V. Kartashov and D.A. Zezyulin, Rotating patterns in polariton condensates in ring-shaped potentials under a bichromatic pump, Opt. Lett. 44, 4805 (2019).

[54] I. Gnusov, H. Sigurdsson, J.D. Töpfer, S. Baryshev, S. Alyatkin, and P.G. Lagoudakis, All-Optical Linear-Polarization Engineering in Single and Coupled Exciton-Polariton Condensates, Phys. Rev. Applied 16, 2021

(57) Формула изобретения

1. Способ оптического управления линейной поляризацией излучения, создаваемого экситон-поляритонным конденсатом, образующимся в неорганическом полупроводниковом образце при его нерезонансном возбуждении лазерным излучением, в котором экситон-поляритонный конденсат возбуждают лазером непрерывного действия с линейной поляризацией на длине волны, отстроенной от моды полупроводникового микрорезонатора, используемого в качестве образца, перед изменением свойств возбуждающего лазерного излучения поляритонный конденсат возбуждают симметричным профилем пучка накачки и сканируют положение образца с целью обнаружения точки, в которой излучение указанного конденсата будет иметь степень поляризации меньше 0,2, после чего профиль возбуждения меняют на эллиптический и управляют линейной поляризацией излучения, изменяя свойства возбуждающего лазерного излучения, таких как эллиптичность профиля пучка лазера возбуждения, ориентация профиля пучка лазера возбуждения на образце, мощность лазерного возбуждения.

2. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что профиль пучка лазера возбуждения представляет собой эллипс.

3. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что вращение профиля пучка лазера возбуждения, а также изменение его эллиптичности осуществляют с помощью пространственного модулятора света при помощи численного алгоритма.

4. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве образца используется полупроводниковый микрорезонатор 2λ GaAs/AlAs_{0,98}P_{0,02} с квантовыми ямами из InGaAs.

5. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что образец помещается в криостат и охлаждается до криогенных температур.

6. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что при нерезонансном лазерном возбуждении образца профилем пучка лазера возбуждения эллиптической формы линейная поляризация излучения конденсата становится ориентированной вдоль короткой оси эллипса возбуждения.

7. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что при вращении профиля пучка лазера возбуждения в плоскости образца линейная поляризация излучения конденсата определяется пространственной ориентацией профиля пучка лазера возбуждения на образце.

8. Способ по п. 3, характеризующийся тем, что скорость вращения линейной поляризации излучения конденсата определяется быстроедействием пространственного модулятора света.

9. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что при увеличении мощности накачки

линейная поляризация излучения конденсата поворачивается.

10. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что при изменении эллиптичности профиля пучка лазера возбуждения, то есть отношения большой и малой осей эллипса профиля пучка лазера возбуждения, меняется степень линейной поляризации излучения конденсата, в частности растет для большей эллиптичности профиля пучка лазера возбуждения.

10

15

20

25

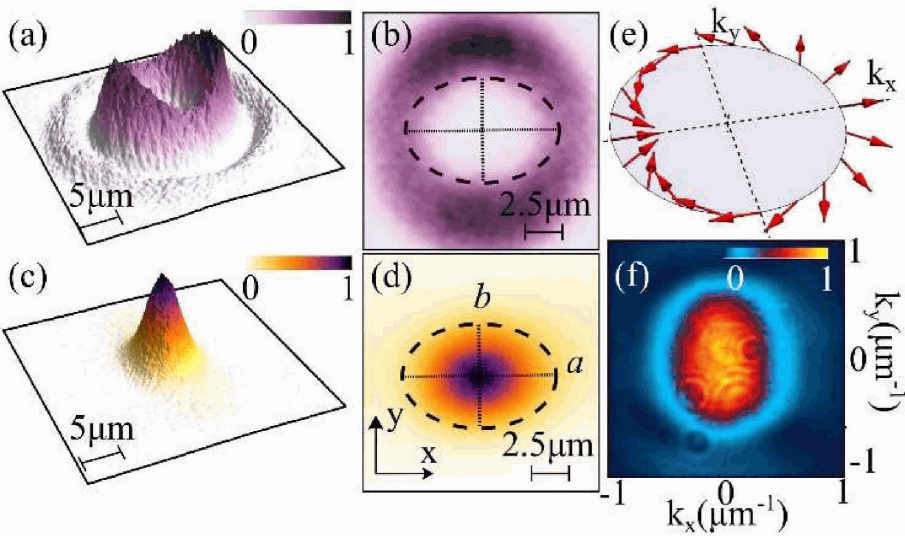
30

35

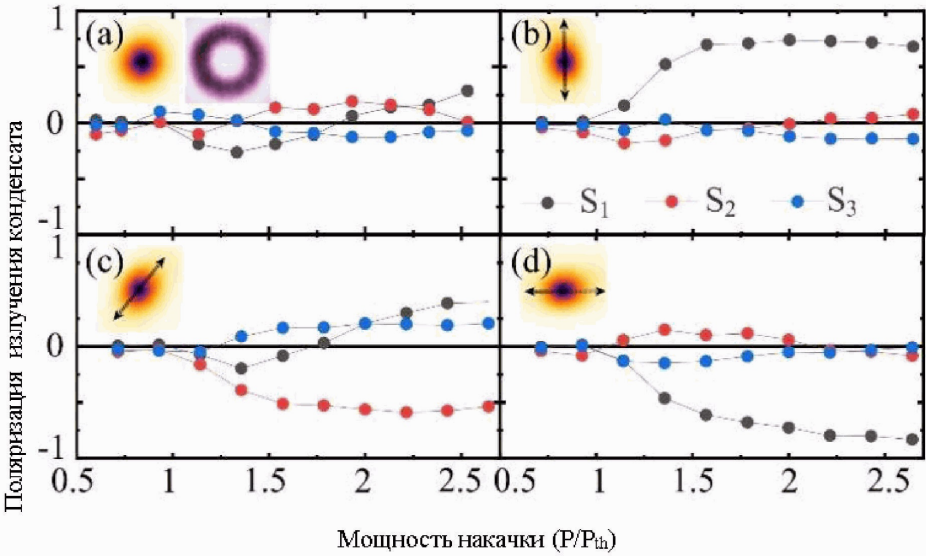
40

45

1

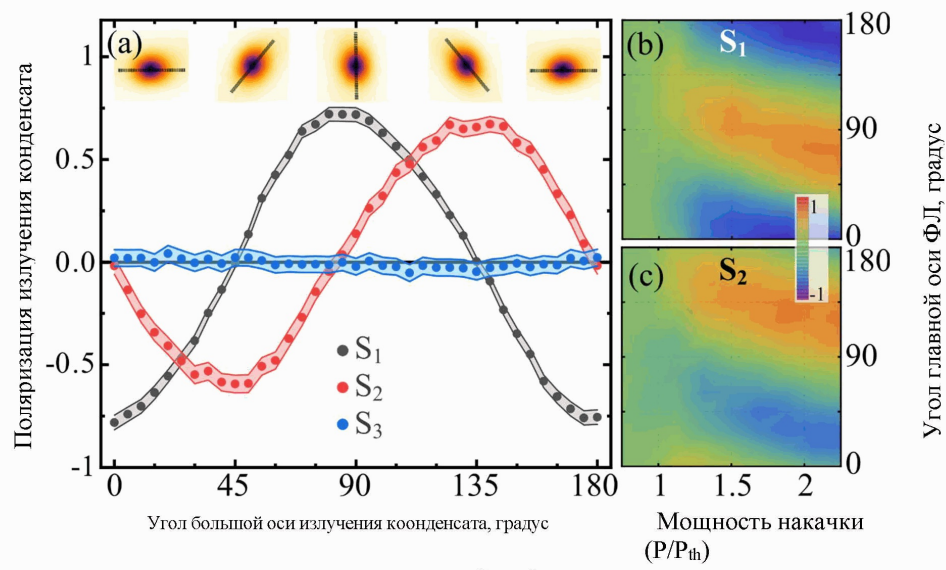


Фиг. 1

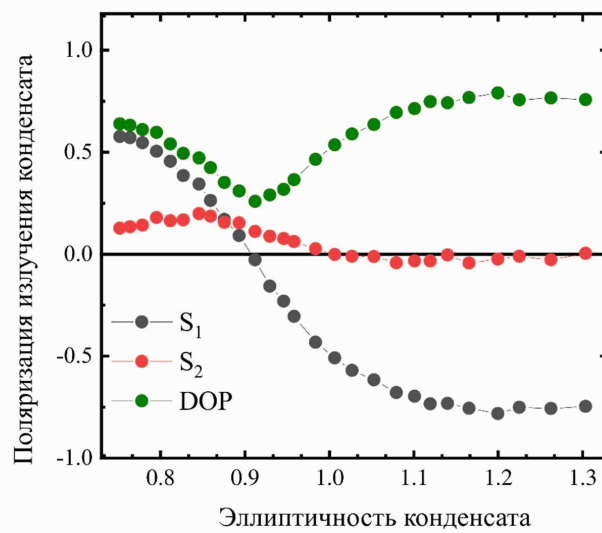


Фиг. 2

2



Фиг. 3



Фиг. 4