Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 2, с. 134 – 139

Перманентный бозе-эйнштейновский конденсат

Ю. М. Буньков[+1)], *П. М. Ветошко*[+*], *Г. А. Князев*[+×], *А. Н. Кузмичёв*[+], *Д. А. Самоделкин*[+]

[+]*М-Гранат, Российский квантовый центр, 143025 Сколково, Москва, Россия*

[*]*Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, 295007 Симферополь, Россия*

[×]*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 21 ноября 2025 г.
После переработки 30 ноября 2025 г.
Принята к публикации 30 ноября 2025 г.

Обычно бозе-эйнштейновская конденсация наблюдается в импульсном режиме, когда облако частиц (или квазичастиц) охлаждается ниже критической температуры и демонстрирует когерентное состояние на ограниченное время. Нам удалось создать магнонный бозе-эйнштейновский конденсат существующий непрерывно, когда исчезновение магнонов компенсируется возбуждением новых магнонов. Мы установили экспериментально, что новые магноны возбуждаются исключительно в состоянии бозе-эйнштейновского конденсата, в соответствии с теорией Р. Фейнмана. Этот результат следует из того, что линия фотонного излучения магнонного бозе-эйнштейновского конденсата резко сужается при переходе в состояние бозе-эйнштейновского конденсата и исчезает спин-решеточное уширение линии. То есть мы непосредственно наблюдаем, что релаксация магнонов в данных условиях и возбуждение новых магнонов не приводит к изменению квантового состояния магнонного бозе-эйнштейновского конденсата. Этот результат следует рассматривать как доказательство того, что процессы релаксации отдельных магнонов не меняют квантовое состояние магнонного бозе-конденсата, что является предпосылкой для создания много частичных квантовых приборов.

DOI: 10.7868/S3034576626010183

Много частичные когерентные состояния вещества, такие как сверхтекучесть, сверхпроводимость, бозе-эйнштейновская конденсация являются фундаментальными квантовыми явлениями, которые наблюдаются при перекрытии волновых функций частиц при их достаточных концентрациях и достаточно низких температурах.

Условия бозе-эйнштейновской конденсации определяются известной формулой, в которую входят плотность, температура и масса частиц.

$$T_{BEC} = \kappa_0 \frac{\hbar^2}{k_B m} \left(\frac{N}{V_s}\right)^{2/3}, \quad \kappa_0 = \frac{2\pi}{\left[\zeta\left(\frac{3}{2}\right)\right]^{2/3}} \simeq 3.31, \tag{1}$$

где $\frac{N}{V_s}$ – плотность частиц, m – их масса, а T – температура. Соответственно $\hbar$ – постоянная Планка, k_B – константа Больцмана и ζ – дзета-функция Римана.

Обычно условия образования атомарного бозе-эйнштейновского конденсата (БЭК) достигаются на относительно короткое время путем оптического охлаждения атомарного газа в ловушке [1, 2]. Процессы нагрева или испарения частиц приводят к его переходу в обычное газовое состояние. С целью увеличения времени жизни атомарного БЭК была создана уникальная установка, в которой атомы в состоянии БЭК впрыскивались в ловушку извне [3], что позволило увеличить время жизни атомарного БЭК в ловушке на три порядка. Данный эксперимент подтвердил теорию Р. Фейнмана, согласно которой инжектируемые атомы не нарушают квантовое состояние БЭК [4]. Однако практическое применение данной системы встречает трудности из-за необходимости достижения чрезвычайно низких температур и решения ряда инженерных задач.

Кроме атомарного БЭК были получены также конденсаты фотонов [5–7]. Кроме частиц, состояния БЭК были получены для квазичастиц: фононов [8], ротонов [9], экситонов [10], поляритоны [11], связанные экситон-поляритонных состояний [12]. Для кванта возбуждения магнитоупорядоченного вещества – магнона – было обнаружено образование двух принципиально разных бозе-конденсатов. Современные исследования магнонного БЭК проводятся в эпитаксиальных пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) намагниченных продольно или перпендикулярно плоскости пленки. При этом свойства магнонных конденсатов принципиально отличаются друг от друга.

[1)]e-mail: y.bunkov@rqc.ru

В случае, когда пленка намагничена в плоскости, минимум энергии магнонов и состояние БЭК соответствует бегущим магнонам с волновым вектором k порядка 10^5 см$^{-1}$. Эксперименты ставятся следующим образом. Магноны большой плотности возбуждаются параметрически на частоте больше удвоенной частоты резонанса магнонного БЭК. В процессе термолизации магноны заполняют состояние, соответствующее минимуму энергии. При помощи оптической установки с использованием эффекта Бриллюэна исследовалась плотность магнонов в зависимости от k. Результаты экспериментов интерпретировались как достижение плотности магнонов, необходимой для образования БЭК [13]. Наиболее важным открытием при данной постановке экспериментов является наблюдение сверхтекучего переноса магнонов за пределы области их возбуждения [14].

Бозе конденсация стационарных магнонов с $k = 0$ была открыта существенно раньше, в 1984 г., при исследованиях магнитного резонанса в сверхтекучем антиферромагнитном ^{3}He-B. Исторически это было первое наблюдение состояния БЭК. Он был обнаружен как спонтанное образование когерентного сигнала прецессии магнонов в неоднородном магнитном поле [15, 16]. Первое теоретическое описание этого явления было построено на модели противотока двух массовых сверхтоков с противоположными спинами [17, 18]. В данном состоянии БЭК были обнаружены все сверхтекучие магнонные явления, аналогичные массовой сверхтекучести.

История этого открытия и связанные с ним сверхтекучие спиновые явления кратко описаны в недавней статье [19], к которой мы и отсылаем читателей для дальнейшего ознакомления. Дальнейшие исследованиях этого явления привели к пониманию того, что образование однородной прецессии намагниченности имеет более фундаментальную природу. Описание этого явления как противотока сверхтекучих компонент является только механизмом ее формирования. Образование данного когерентного состояния является результатом бозе-эйнштейновской конденсации магнонов [20–22] и может формироваться и в отсутствии массовой сверхтекучести.

Во многом аналогичная бозе-эйнштейновская конденсация магнонов с $k = 0$ была обнаружена и в пленках ЖИГ, намагниченных перпендикулярно плоскости пленок. Критическая концентрация магнонов для образования магнонного бозе-эйнштейновского конденсата (мБЭК) для различных магнетиков может быть вычислена из параметров спектра магнонов. Так, для пленки ЖИГ, намагниченной перпендикулярно поверхности, критическая плотность магнонов соответствует динамическому отклонению намагниченности на угол 2.5° [23]. Актуальный обзор экспериментальных результатов исследования магнонного БЭК в данной конфигурации можно также найти в [19]. В данной статье, в частности, описано проведение экспериментов по наблюдению фазового перехода от газа магнонов к магнонному БЭК при концентрации магнонов, соответствующей отклонению прецессирующей намагниченности на угол 3°.

Для непосредственного наблюдения пространственного распределения магнонов при разной их концентрации была создана уникальная оптическая установка, в которой с помощью использования эффекта Фарадея удалось исследовать амплитудно-фазовые характеристики прецессирующей намагниченности как в области возбуждения магнонов, так и за ее пределами. Принципы работы установки были описаны в [24]. Ее применение для исследования магнонной бозе-конденсации представлено в [25, 26]. Экспериментально было показано, что при отклонении прецессирующей намагниченности на угол менее 2.5° образуются спиновые волны, распространяющиеся из области возбуждения магнонов, в полном соответствии с квазиклассической теорией Ландау–Лифшица. Однако при достижении угла прецессии намагниченности более 3° в области возбуждения, прецессирующая намагниченность скачком заполняет весь образец и становится пространственно однородной. Этот результат противоречит квазиклассической теории Ландау–Лифшица, однако соответствует представлениям о формировании бозе-конденсата [27]. Были также проведены исследования прецессии намагниченности при изменении концентрации магнонов. Показано, что фазовый переход от газа магнонов к магнонному БЭК происходит при отклонении прецессирующей намагниченности в 3°, что согласуется как с теоретическими, так и со всеми экспериментальными исследованиями [28]. Весь объем полученных эксперименталных результатов показывает справедливость концепции магнонного БЭК в пленке ЖИГ при достаточной плотности магнонов.

Целью данной работы является проверка теории Р. Фейнмана, согласно которой в присутствии бозе-конденсата возбуждаемые новые квазичастицы образуются только в состоянии бозе-конденсата [4]. Магноны, возбуждаемые прямой радиочастотной накачкой, образуют мБЭК с химическим потенциалом, соответствующим частоте накачки. При этом возникает равновесное состояние мБЭК, плотность которого не зависит от амплитуды накачкой [29]. (Этот результат не соответствует интуиции исследователей, занимающихся параметрической накачкой магнонов [30].) Соответственно и генерация фотонов из мБЭК также определяется частотой накачки. Для получения собственной частоты мБЭК без ее задания внешней накачкой мы использовали принцип автогенератора. Построение автогенераторов на основе ЖИГ хорошо известно. В некоторых работах использовался ЖИГ в виде эпитаксиальной пленки [31–33]. При этом исследовался диапазон накачек, соответствующий малой концентрации магнонов. Мы существенно увеличили усиление обратной связи и вышли в область амплитуд, соответствующих образованию мБЭК.

Фотография монтажа образца и блок-схема установки показаны на рис. 1. Мы использовали две полосковые линии расположенные перпендикулярно друг другу на обеих сторонах образца. Линия 1 использовалась в качестве антенны для приема сигнала от ЖИГ. Этот сигнал усиливался с помощью транзистора MGF4953B, присоединенного непосредственно к первой полосковой линии на минимальном расстоянии. Далее сигнал поступал на осциллограф Keysight MXR054A и векторный анализатор Keysight M9804A. Затем сигнал поступал на усилитель TQP3M9037-LNA с аттенюатором ZX76-31R75PP-S+, который использовался для изменения амплитуды сигнала обратной связи. Наконец, сигнал подавался на второй полосок для возбуждения магнонов. В качестве образца использовалась эпитаксиальная пленка ЖИГ, выращенная методом эпитаксии на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной 0.5 мм в Крымском федеральном университете [34]. Образец ЖИГ имел диаметром 4 мм и толщину 15 мкм.

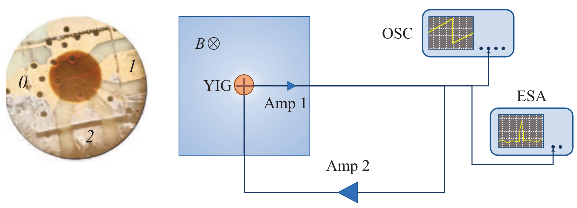

Рис. 1. (Цветной онлайн) Слева: монтаж образца на плате с полосковыми линиями. *1* – антенна; *2* – линия возбуждения (расположен под подложкой); *0* – земля. Справа: схема установки. Сигнал излучения усиливается транзистором 1, наблюдается на осциллографе и спектр-анализаторе, затем усиливается вторым усилителем и подается на полосок возбуждения

Мы наблюдали сигнал автогенерации при коэффициенте усиления в линии обратной связи от 6 до 16 дБ. При этом частота сигнала зависела от отклонения процессирующей намагниченности из-за изменения поля размагничивания. Частота и угол отклонения увеличивались при увеличении коэффициента усиления.

$$\omega = \gamma(H_0 - 4\pi M_S \cos\beta), \tag{2}$$

где β – угол отклонения намагниченности, H_0 и M_S – локальное магнитное поле и намагниченность ферримагнитного образца.

Спектры сигналов автогенерации при разном коэффициенте усиления обратной связи показаны на рис. 2. По изменению частоты сигнала в постоянном поле удалось определить угол отклонения прецессирующей намагниченности и, соответственно, плотность магнонов.

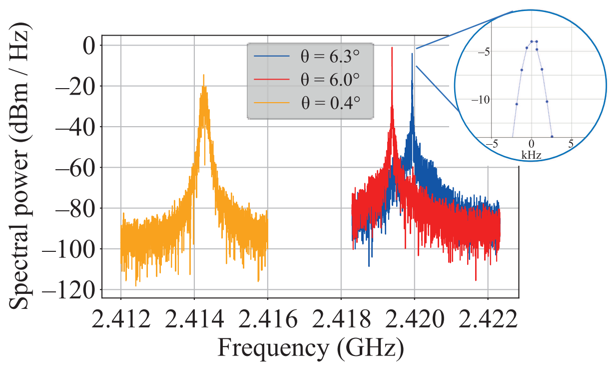

Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектр сигналов излучения автогенератора при коэффициенте усиления в 6.5 дБ (слева) и 13.8 дБ (красный) и 15.3 дБ (синий). Сдвиги частоты соответствуют углам отклонения прецессирующей намагниченности в 0.4°, 6° и 6.3°. Желтый сигнал соответствует газу магнонов, а красный и синий – магнонному БЭК. На вставке показана ширина линии излучения БЭК

На рисунках 3 и 4 показана полуширина линии излучения фотонов в зависимости от усиления сигнала обратной связи и, соответственно, от угла отклонения прецессирующей намагниченности. При малом усилении наблюдается уширение линии излучения порядка 200 кГц, что, видимо, связано с процессом спин-решеточной релаксации T_1 магнонов в фононы. Непосредственно измерить величину T_1 весьма сложно, так как в измерения вносят вклад и спин-спиновая релаксация, и неоднородное уширение линии. Данный результат ширины линии соответствует образцам очень высокого качества. При увеличении усиления обратной связи спектр сигнала резко сужается до двух порядков при углах отклонения намагниченности, соответствующим формированию БЭК. Это основной результат данного эксперимента.

Энергия возбуждения магнонов определяется каскадом усиления сигнала собственной частоты.

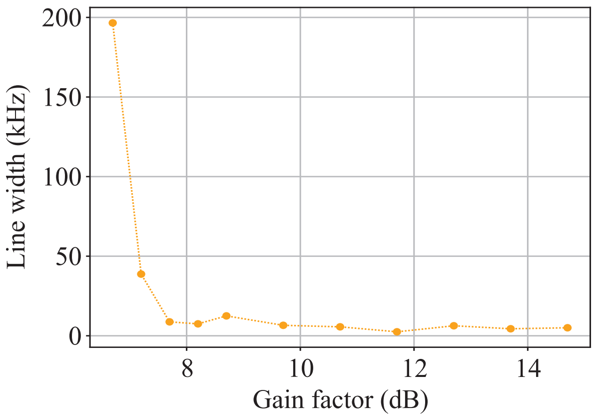

Рис. 3. (Цветной онлайн) Полуширина линии излучения фотонов как функция усиления сигнала обратной связи

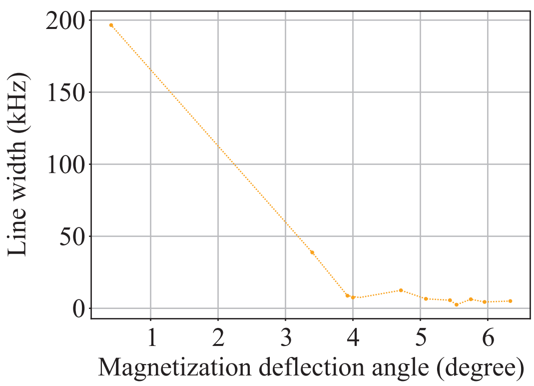

Рис. 4. (Цветной онлайн) Полуширина линии излучения фотонов как функция угла отклонения прецессирующей намагниченности

При этом после первого каскада мы наблюдаем резкое сужение линии при переходе в область БЭК. При обычной постановке эксперимента по магнитному резонансу на этом образце ширина линии составляет около 3 МГц на частоте 2.38 ГГц. При образовании мБЭК при внешней накачке пропадает неоднородное уширение и спин-спиновая релаксация. Ширина линии поглощения уменьшается до 500 кГц.

В эксперименте с автогенерацией происходит также сужение линии излучения фотонов. В области существования магнонного газа ширина линии сужается до 200 кГц. При переходе в состояние БЭК она сужается до 10 кГц и даже меньше. Более точное определение ширины линии излучения требует более тщательной постановки эксперимента.

Таким образом, в проведенном эксперименте нам удалось создать магнонный БЭК, существующий непрерывно, и получить излучение ЖИГ с экстремально узкой полосой. Имея ввиду, что магноны находятся в когерентном состоянии, излучение также должно обладать когерентностью по аналогии с излучением поляритонов из экситон-поляритонного БЭК [35]. Наблюдаемое уширение линии излучения, возможно, связано с несовершенством измерительной аппаратуры.

Разумно предположить, что процесс возбуждения фононов магнонами не зависит от состояния БЭК магнонов. В таком случае должна сохраняться скорость спин-решеточной релаксации и, соответственно, уширение линии излучения порядка сотен МГц. Однако мы наблюдаем сужение линии на пару порядков. Отсюда следует, что процессы релаксации магнонов в фононы не приводят к уширению линии излучения. Этот результат является очень важным в силу современной дискуссии, изменяется ли квантовое состояние мБЭК при уходе из ансамбля части частиц. Мы предполагаем, что данный эффект связан с тем, что исчезновение части магнонов компенсируется генерацией новых в том же квантовом состоянии, что подтверждает теоретические рассуждения Р. Фейнмана [4]. Изменение плотности частиц в БЭК должно приводить к образованию голдстоуновских мод колебаний [36]. Можно предположить, что процесс замещения магнонов не должен отражаться на квантовом состоянии БЭК, если постоянная времени рождения новых магнонов существенно короче, чем обратная частота голдстоуновских мод.

Можно сделать и альтернативное предположение, что фононная мода колебаний насыщается или даже переходит в состояние фононного БЭК и возникает смешанная фонон-магнонная мода БЭК, что останавливает процесс спин-решеточной релаксации магнонов. Данная гипотеза требует дальнейшего исследования.

В заключение, создан макроскопический квантовый объект, характеризующийся чрезвычайно узкой линией излучения, соответствующей усредненному полю на макроскопических размерах. Он может найти применение в качестве квантового сенсора градиента магнитного поля путем измерения интерференции сигналов от двух таких датчиков, расположенных на некотором расстоянии. Следует проанализировать также возможность использования ансамбля таких объектов, взаимодействующих между собой, для квантовых вычислений, по аналогии с экситон-поляритонными ансамблями БЭК, с которыми они имеют много общего.

Финансирование работы. Эта работа финансировалась в рамках проекта # 22-12-00322-п Российского научного фонда.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthew, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, "Observation of Bose–Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor", Science **269**, 5221 (1995).
2. K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, M. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, "Bose–Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms", Phys. Rev. Lett. **75**, 3969 (1995).
3. Ch.-Ch. Chen, R. G. Escudero, J. Minář, B. Pasquiou, S. Bennetts, and F. Schreck, "Continuous Bose–Einstein condensation", Nature **606**, 683 (2022).
4. R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Basic Books, N.Y., 2005).
5. J. Klaers, J. Schmitt, F. Vewinger, and M. Weitz, Nature, **468**, 545 (2010).
6. J. Schmitt, T. Damm, F. Vewinger, and M. Weitz, "Bose–Einstein condensation of paraxial light", Appl. Phys. B Laser Opt. **105**, 17 (2011).
7. J. L. Figueiredo, J. T. Mendonça, and H. Terças, "Bose–Einstein condensation of photons in microcavity plasmas", Phys. Rev. **108**, 013201 (2023).
8. D. M. Stamper-Kurn, A. P. Chikkatur, A. Görlitz, S. Inouye, S. Gupta, D. E. Pritchard, and W. Ketterle, "Excitation of Phonons in a Bose–Einstein Condensate by Light Scattering", Phys. Rev. Lett. **83**, 2876 (1999).
9. L. A. Melnikovsky, "Bose–Einstein condensation of rotons", Phys. Rev. B **84**, 024525 (2011).
10. L. V. Butov, A. L. Ivanov, A. Imamogluet, P. B. Littlewood, A. A. Shashkin, V. T. Dolgopolov, K. L. Campman, and A. C. Gossard, "Stimulated scattering of indirect excitons in coupled quantum wells: Signature of a degenerate Bose-gas of excitons", Phys. Rev. Lett. **86**, 5608 (2001).
11. B. Deveaud-Pledran, "On the condensation of polaritons", J. Opt. Soc. Am. **29**, 138 (2012).
12. J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymaska, 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).
13. S. O. Demokritov, V. E. Demidov, O. Dzyapko, G. A. Melkov, A. A. Serga, B. Hillebrands, and A. N. Slavin, "Bose–Einstein condensation of quasiequilibrium magnons at room temperature under pumping", Nature **443**, 430 (2006).
14. D. Bozhko, A. A. Serga, P. Clausen, V. I. Vasyuchka, F. H. Gennadii, A. Melkov, A. Pomyalov, V. S. L'vov, and B. Hillebrands, "Supercurrent in a room temperature Bose–Einstein magnon condensate", Nature Phys. **12**, 1057 (2016).
15. А. С. Боровик-Романов, Ю. М. Буньков, В. В. Дмитриев, Ю. М. Мухарский, "Исследования долгоживущего сигнала индукции в сверхтекучем 3He-B", Письма в ЖЭТФ **40**, 256 (1984) [A. S. Borovik-Romanov, Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, and Yu. M. Mukharskiy, "Long Lievd Induction Decay Signal Investigations in 3He", JETP Lett. **40**, 1033 (1984)].
16. Yu. M. Bunkov, "Spin Supercurrent and coherent spin precession, London prize lecture", J. Phys.: Cond. Matter. **21**, 164201 (2009).
17. И. А. Фомин, "Долгоживущий сигнал индукции и пространственно неоднородная прецессия спина в 3He-B", Письма в ЖЭТФ **40**, 260 (1984) [I. A. Fomin, "Long-lived induction signal and spatially nonuniform spin precession in 3He-B", JETP Lett. **40**, 1037 (1984)].
18. И. А. Фомин, "Разбиение прецессии намагниченности в 3He-B на два домена. Теория", ЖЭТФ **88**, 2039 (1985) [I. A. Fomin, "Separation of magnetization precession in 3He-B into two magnetic domains", Sov. Phys. JETP **61**, 1207 (1985)].
19. Ю. М. Буньков, В. И. Белотелов, П. М. Ветошко, Г. А. Князев, А. Н. Кузмичев, П. Е. Петров, "Магнонный сверхток и сброс фазы в пленке железоиттриевого граната", Письма в ЖЭТФ **120**, 436 (2024) [Yu. M. Bunkov, V. I. Belotelov, P. M. Vetoshko, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, and P. E. Petrov, JETP Lett. **120**, 436 (2024)].
20. G. E. Volovik, "Twenty Years of Magnon Bose Condensation and Spin Current Superfluidity in ^{3}He-B", J. Low Temp. Phys. **153**, 266 (2008).
21. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, "Magnon Bose Einstein Condensation and Spin Superfluidity", J. Phys.: Condens. Matter. **22**, 164210 (2010).
22. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, "Bose–Einstein Condensation of Magnons in Superfluid ^{3}He", J. Low Temp. Phys. **150**, 135 (2008).
23. Yu. M. Bunkov, V. L. Safonov, "Magnon condensation and spin superfluidity", J. Magn. Magn. Mater. **452,** 30 (2018).
24. P. M. Vetoshko, V. B. Volkovoy, V. N. Zalogin, and A. Y. Toporov, "Measuring low alternating magnetic-fields by means of Bi-Containing rare-earth ferrite-garnet films with planar anisotropy", J. Appl. Phys. **70**, 6298 (1991).
25. P. E. Petrov, P. O. Kapralov, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, P. M. Vetoshko, Yu. M. Bunkov, and V. I. Belotelov, "Magneto-optical imaging of coherent spin dynamics in ferrites", Opt. Express **30**, 1737 (2022).
26. P. E. Petrov, P. O. Kapralov, G. A. Knyazevet, A. N. Kuzmichev, P. M. Vetoshko, Yu. M. Bunkov, V. I. Belotelov, "Optical registration of a coherent magnon state outside of the excitation region", Opt. Express **31**, 8335 (2023).
27. G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, P. E. Petrov, I. V. Savochkin, P. M. Vetoshko, V. I. Belotelov, and Yu. M. Bunkov, "Direct observation of the transition from spin waves to the magnon Bose condensate", Opt. Express **32**, 13761 (2024).

28. П. Е. Петров, Г. А. Князев, А. Н. Кузмичев, П. М. Ветошко, В. И. Белотелов, Ю. М. Буньков, "Переход в магнонный Бозе конденсат", Письма в ЖЭТФ **119**, 118 (2024) [P. E. Petrov, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, P. M. Vetoshko, V. I. Belotelov, Yu. M. Bunkov, "Transition to a Magnon Bose–Einstein Condensate", JETP Lett. **119**, 118 (2024)].
29. Yu. M. Bunkov, A. N. Kuzmichev, T. R. Safin, P. M. Vetoshko, V. I. Belotelov, and M. S. Tagirov, "Quantum paradigm of the foldover magnetic resonance", Sci. Rep. **11**, 7673 (2021).
30. Ю. М. Буньков, "Ответ на комментарий к статье "Бозе-конденсация и спиновая сверхтекучесть магнонов в перпендикулярно намагниченной пленке железо-иттриевого граната", Письма в ЖЭТФ **115**, 740 (2022) [Yu. M. Bunkov, "Response to a comment on the article "Bose Condensation and Spin Superfluidity of Magnons in a Perpendicularly Magnetized Yttrium Iron Garnet Film", JETP Lett. **115**, 694 (2022)].
31. А. Н. Литвиненко, В. В. Тихонов "Термостабильный перестраиваемый ЖИГ-генератор", Известия Саратовского университета. Физика **14**, 35 (2014) [A. N. Litvinenko and V. V. Tikhonov, "Thermostable Tunable YIG Oscillator", Izvestiya of Saratov University. Physics **14**, 35 (2014)].
32. A. A. Nikitin, I. Yu. Tatsenko, M. P. Kostylev, and A. B. Ustinov, "Microwave magnonic micro-oscillator based on a nm-thick YIG film", J. Appl. Phys. **135**, 123906 (2024).
33. P. Sgarro, R. Ovcharov, R. Khymyn, S. Ghosh, A. A. Awad, J. Åkerman, and A. Litvinenko, "Frequency-tunable low-noise oscillator based on yttrium-iron-garnet/gadolinium-gallium-garnet structure with strong magnetoelastic coupling", Phys. Rev. Appl. **23**, 064049 (2025).
34. A. N. Kuzmichev, V. I. Belotelov, Yu. M. Bunkov, P. M. Vetoshko, A. I. Popov, V. N. Berzhansky, A. N. Shaposhnikov, Ch. K. Sabdenov, A. V. Koshelev, and A. A. Fedorenko, "Identification of a new source of magnon relaxation in interface between epitaxial iron garnet ferrite films and GGG substrate", Materials Research Bulletin **149**, 111691 (2022).
35. S. Kim, B. Zhang, Zh. Wang, J. Fischer, S. Brodbeck, M. Kamp, Ch. Schneider, S. Höfling, and H. Deng, "Coherent Polariton Laser", Phys. Rev. X **6**, 011026 (2016).
36. Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, Yu. M. Mukharskiy, "Low frequency oscillations of the homogeneously precessing domain in ^{3}He-B", Physica B **178**, 196 (1992).