Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 12, с. 886 – 891

Устойчивые моды в автогенераторе магнонного бозе-энштейновского конденсата

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

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

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

[×]*Международный центр теоретической физики им. А. А. Абрикосова,*
Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Россия

Поступила в редакцию 23 апреля 2026 г.
После переработки 23 апреля 2026 г.
Принята к публикации 4 мая 2026 г.

Недавно нами был получен постоянно существующий бозе-эйнштейновский конденсат (БЭК) магнонов в режиме автогенерации. Мы показали, что процессы релаксации магнонов не нарушают когерентное состояние БЭК при компенсации релаксации магнонов за счет возбуждения новых магнонов при подаче на образец усиленного сигнала излучения магнонного БЭК. Это связано с эффектом бозонного усиления, при котором в присутствии БЭК возбуждаются только магноны, соответствующие квантовому состоянию БЭК. В новых исследованиях, описываемых в этой статье, мы получили набор устойчивых состояний конденсата, который определяется соотношением фаз радиочастотного сигнала, излучаемого БЭК и подаваемого обратно усиленного сигнала. Мы экспериментально обнаружили образование устойчивых зон генерации БЭК, соответствующих скачку фазы кратному 2π на линии обратной связи. Построена теоретическая модель, описывающая данный процесс перехода между состояниями БЭК в автогенераторе. Данная модель имеет много общего с известной моделью стиральной доски для фазовых кубитов.

DOI: 10.7868/S3034576626060189

Многочастичные когерентные состояния вещества, такие как сверхтекучесть, сверхпроводимость, бозе-эйнштейновская конденсация (БЭК) являются фундаментальными квантовыми явлениями, которые наблюдаются при перекрытии волновых функций частиц при достаточно низких температурах. В данной работе мы имеем дело с квантовыми свойствами газа магнонов – квазичастиц возбуждения в упорядоченных магнитных системах.

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

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

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.

Впервые магнонная бозе-эйнштейновская конденсация была обнаружена как эффект спиновой сверхтекучести, сопровождающий массовую сверхтекучесть в антиферромагнитном ^{3}He-B в виде противотока двух сверхтекучих компонент жидкости с противоположными магнитными моментами [1–3].

Возможность образования магнонного БЭК и спиновой сверхтекучести в твердотельных магнетиках была показана в системах со связанной ядерно-электронной прецессией в антиферромагнетиках [4]. Величина критической плотности магнонов для образования мБЭК в этих системах была вычислена в [5]. МБЭК был обнаружен в квазиядерной моде прецессии в $CsMnF_3$ и в $MnCO_3$ [6, 7], где наблюдался эффект нерезонансного возбуждения мБЭК и голдстоуновские моды колебаний Бозе-конденсата.

Настоящим прорывом стало обнаружение явления магнонной бозе-эйнштейновской конденсации магнонов в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) при комнатной температуре [8, 9]. Магноны в пленках ЖИГ, намагниченных перпендикулярно плоскости образца, имеют минимум энергии при волновом векторе k, равном нулю, и характеризуются взаимодействием отталкивания. Поэтому мБЭК образуется стационарными магнонами как

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

и в атомарном БЭК. В связи с тем, что магноны являются квазичастицами в магнитоупорядоченных системах, их равновесная плотность определяется температурой системы. При этом она всегда меньше, чем концентрация магнонов, необходимая для Бозе-конденсации. Однако их плотность можно существенно увеличить путем возбуждения неравновесных магнонов. Критическая концентрация магнонов для образования 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° [10].

Было также показано, что и в другой геометрии экспериментов, в которых пленка ЖИГ намагничена параллельно плоскости, также удается получить плотность магнонов, соответствующую образованию БЭК [11]. В этом случае, при параметрической накачке спиновых волн, последние концентрируются в минимуме энергии, соответствующем бегущим магнонам с ненулевым волновым вектором k. При этом удается наблюдать также эффекты, связанные со сверхтекучими свойствами магнонного Бозе конденсата [12]. Следует добавить, что магнонная Бозе конденсация была обнаружена и для стоячих магнонов в этой геометрии при прямом резонансном возбуждении. При этом мБЭК образуется в седловой точке магнонного потенциала [13].

Следует обратить внимание на то, что образование аналогичных неравновесных БЭК наблюдается также и при возбуждении экситон-поляритонных квазичастиц в полупроводниковых микрорезонаторах [14]. В этих системах исследуются аналогичные процессы пространственного переноса конденсата и эффект Джозефсона [15]. В частности, недавно обнаружен эффект квантового переключения мод БЭК [16], во многом аналогичный эффекту, представленному в этой статье.

Обычно бозе-эйнштейновские конденсаты существуют в импульсном режиме и распадаются за относительно короткое время. Недавно нам удалось получить непрерывно существующий магнонный бозе-эйнштейновский конденсат (мБЭК) при условии компенсации процессов релаксации за счет автоподкачки новых магнонов. В разработанной нами схеме радиочастотное (РЧ) излучение магнонов усиливается РЧ усилителями и затем подается обратно в магнонную систему [17]. При этом, при достаточной мощности усиления в линии обратной связи, нам удалось получить концентрацию магнонов, соответствующую образованию магнонного бозе-эйнштейновского конденсата. За счет бозонного усиления [18] возбуждаемые магноны возникают именно в том состоянии, в котором находятся магноны БЭК. Нам удалось поддерживать магнонный БЭК непрерывно и наблюдать очень узкую линию РЧ излучения магнонов: на два порядка уже, чем должна быть при излучении неупорядоченного газа магнонов. В данной статье мы описываем результаты экспериментов по образованию устойчивых состояний магнонного БЭК при изменении внешнего магнитного поля. Благодаря зависимости частоты мБЭК от плотности магнонов возникает нетривиальная зависимость устойчивости БЭК от условий обратной связи, что приводит к переключению мод БЭК. Удивительно, нам удалось наблюдать одновременное сосуществование двух мод мБЭК с разными частотами, а также гистерезис поля переключения между модами.

В системе неравновесных магнонов роль плотности частиц $\mathcal{N}$ играет проекция полного спина на направление внешнего магнитного поля $\mathcal{S}_z$. Возбуждение неравновесных магнонов приводит к уменьшению продольной намагниченности системы $\mathcal{S}_z$ и, соответственно, к уменьшению поля размагничивания ферритовой пленки. Этот эффект можно рассматривать как взаимодействие между магнонами, которое приводит к сдвигу частоты прецессии на величину $\Delta\omega$, которая определяет длину когерентности и критическую скорость сверхтекучего тока магнонов [19, 20]. Таким образом, частота прецессии намагниченности в пленке ЖИГ описывается уравнением:

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

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

Большим достоинством магнонной сверхтекучести является то, что данное состояние с отклоненной и прецессирующей намагниченностью является основным состоянием системы при заданной плотности магнонов. Поэтому его можно поддерживать непрерывно, возмещая испаряющиеся магноны генерацией новых при помощи РЧ накачки. При этом новые магноны рождаются в состоянии уже существующего Бозе-конденсата [18]. Более того, частота РЧ накачки определяет химический потенциал и соответствующую плотность неравновесных магнонов [3, 21]. Сканируя частоту (или магнитное поле) при постоянной РЧ накачке, возможно изменять плотность магнонов в конденсате [22]. Этим объясняется так называемый эффект "фолдовер" магнитного резонанса, заключающийся в том, что частота прецессии намагниченности при достаточно большой мощности накачки следует за увеличивающейся частотой накачки (или уменьшающимся магнитным полем). Это явление было первоначально объяснено Андерсоном и Сулом как сдвиг частоты прецессии при отклонении намагниченности [23]. И хотя качественно эта теория объясняла эффект, экспериментальные результаты сильно отличались от предсказанных теорией [24]. Хорошее согласие теории с экспериментальными результатами было получено в [25] при модификации теории с учетом образования магнонной Бозе-конденсации, когда плотность магнонов определяется не амплитудой РЧ накачки, как в теории [23], а сдвигом частоты от резонанса, т.е. химическим потенциалом образовавшегося мБЭК.

В актуальной статье [17] была впервые продемонстрирована работа автогенератора на основе магнонного БЭК. В качестве автогенераторов обычно используется резонатор с положительной обратной связью. В качестве резонатора часто используется магнитный резонанс на сферическом образце ЖИГ, как одного из самых добротных резонаторов. В ряде работ, кроме сферических, также использовались образцы в виде эпитаксиальной пленки ЖИГ, которые, естественно, имеют существенно большее уширение резонансной линии, но имеют ряд преимуществ, таких как плоская форма и термостабилизация через массивную подложку [26–28]. В работе [17] был создан автогенератор на основе пленки ЖИГ. Было показано, что при относительно малом коэффициенте усиления сигнала в линии обратной связи мы имеем стандартный автогенератор на газе магнонов. Однако, при увеличении коэффициента обратной связи плотность магнонов в образце повышается и достигает условий магнонной бозе-эйнштейновской конденсации. Такое когерентное состояние газа магнонов в режиме автогенерации было получено впервые. При этом наблюдается резкое сужение ширины линии излучения на два порядка и более, что подтверждает образование мБЭК.

В данной статье мы публикуем результаты исследования нетривиального поведения сигнала автогенератора при сканировании магнитного поля. Принципиальная схема автогенератора показана на рис. 1.

Фотография монтажа образца и блок-схема установки показаны на рис. 1. Мы использовали две полосковые линии, расположенные перпендикулярно на обоих сторонах образца. Линия 1 использовалась в качестве антенны для приема сигнала от ЖИГ. Этот сигнал усиливался с помощью транзистора MGF4953B, присоединенного

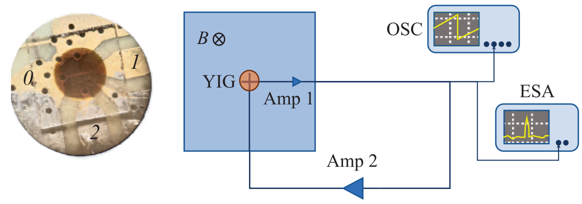

Рис. 1. (Цветной онлайн) Слева: монтаж образца на плате с полосковыми линиями. *1* – антенна; *2* – линия возбуждения (расположена под подложкой); 0 – земля. Справа: схема установки. Сигнал излучения усиливается транзистором *1*, наблюдается на осциллографе и спектр-анализаторе, затем усиливается вторым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

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 [29]. Образец ЖИГ имел диаметр 4 мм и толщину 15 мкм.

На рисунке 2 показано изменение частоты мБЭК при сканировании внешнего магнитного поля при постоянном коэффициенте усиления в линии обратной связи. Оказалось, что частота мБЭК скачкообразно меняется при изменении величины магнитного поля. Это, видимо, связано с тем, что при изменении поля меняется согласование на линии обратной связи, что приводит к уменьшению генерации новых магнонов и, соответственно, изменению сдвига частоты. При достижении критической плотности магнонов происходит образование новой моды мБЭК в данной системе и наблюдается скачкообразное изменение частоты мБЭК. Таким образом, мы наблюдаем переключение между различными квантовыми состояниями мБЭК.

Такое поведение конденсата магнонов во многом аналогично сбросу фазы в замкнутом контуре сверхпроводника. Действительно, магнонный БЭК излучает монохроматический РЧ сигнал. После каскадов усиления, естественно, возникает уширение спектра этого сигнала. Поэтому можно представить возвратный сигнал как классический объект, аналог связи через классический проводник. Однако, за счет бозонного усиления, магнонный БЭК поглощает толь-

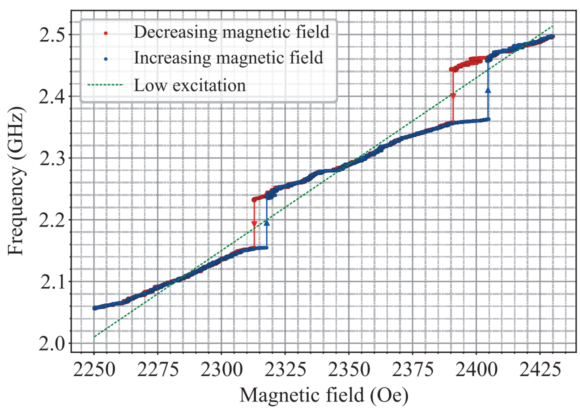

Рис. 2. (Цветной онлайн) Частота излучения автогенератора при сканировании внешнего магнитного поля. Видно, что зависимость частоты отклоняется от линейной зависимости от поля. При изменении поля меняется согласование на линии обратной связи что приводит к уменьшению плотности магнонов и сдвигу частоты. При дальнейшем изменении магнитного поля возникает переход в новую моду на линии обратной связи. Также наблюдается выраженный гистерезис

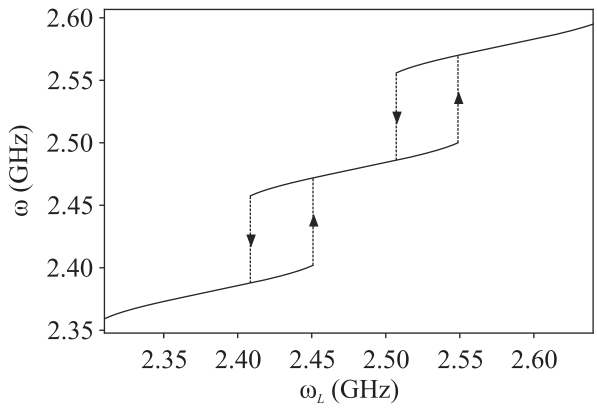

Рис. 3. Частоты собственных мод БЭК магнонов при автогенерации, полученные с помощью уравнения (3)

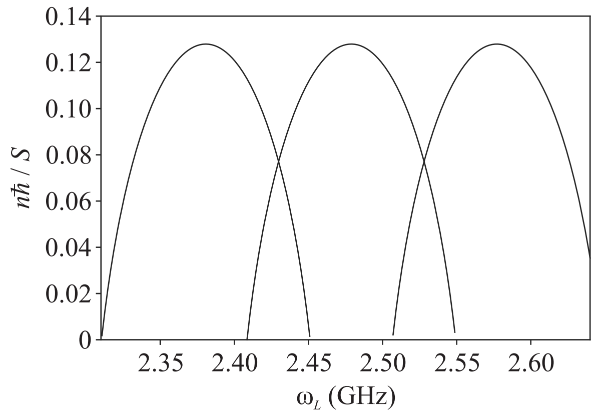

Рис. 4. Плотности магнонов в собственных модах БЭК магнонов при автогенерации, полученные с помощью уравнения (3)

ко фотоны, соответствующие состоянию магнонного БЭК. Соответственно, линия обратной связи передает в БЭК только когерентные фотоны, и возбуждает только когерентные магноны. То есть эта связь аналогична сверхпроводящему контакту. Остается только представить, что связь между конденсатами идет не через пространство, как в сверхпроводящем кольце, а через время задержки между процессом излучения фотонов и их поглощением в БЭК.

Для теоретического описания такого поведения сигнала и гистерезиса мы используем уравнение Гросса–Питаевского для параметра порядка $\psi = \sqrt{n}e^{i\varphi}$, где n – плотность магнонного конденсата, а φ – его фаза (фаза прецессии намагниченности). Уравнение для конденсата с автогенерацией имеет следующий вид:

$$i\frac{\partial\psi(t)}{\partial t} = \omega_L\psi(t) + p\sqrt{2S/\hbar - n}\,\psi(t-\tau) - i\gamma\psi(t). \quad (3)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (3) описывает ларморовскую прецессию во внешнем магнитном поле с частотой ω_L. Второе слагаемое отражает накачку конденсата через линию обратной связи с коэффициентом усиления p и временем задержки τ. Наконец, последнее слагаемое описывает уход магнонов из конденсата с коэффициентом затухания γ. Частоты и плотности для собственных решений уравнения (3) для разных значений ларморовской частоты (величины внешнего магнитного поля) показаны на рис. 3 и 4 соответственно. Частоты собственных решений при изменении магнитного поля образуют набор непрерывных мод. Как видно из рис. 4, плотность магнонов имеет максимум в центре мод и уменьшается к краям моды. Такая зависимость плотности от частоты объясняется сдвигом фазы между конденсатом и полем накачки. Приход частиц в конденсат пропорционален синусу сдвига фаз между конденсатом и полем накачки. Сигнал накачки через линию обратной связи пропорционален сигналу конденсата с задержкой по времени ($\psi(t-\tau)$). Таким образом, сдвиг фаз $\Delta\varphi = \omega\tau$ и плотность магнонов зависят от частоты. К краям собственных мод сдвиг фаз между полем накачки и конденсатом становится таким, что приход магнонов не компенсирует их уход, и происходит переход на другую моду. Так как края собственных мод перекрываются, наблюдается гистерезис при изменении внешнего магнитного поля.

Таким образом, мы создали квантовый объект с очень нетривиальными свойствами. Во-первых, он является непрерывно существующим Бозе-конденсатом с собственной частотой генерации, не зависящей от внешних накачек. Энергия для компенсации процессов релаксации магнонов подается за счет постоянного питания транзисторов постоянным током. Во-вторых, образуются зоны существования мБЭК, область существования которых обуславливается фазовым соотношением на линии обратной связи. В этом смысле возникает аналогия с потенциалом “стиральной доски”, используемым для создания фазовых кубитов. В частности, продемонстрировано явление, которое можно назвать “когерентный переключатель”. В ряде предварительных экспериментов мы нашли способ переключения между модами мБЭК как слабым РЧ, так и слабым импульсом магнитного поля. Кроме того, мы обнаружили условия одновременного сосуществования двух мод с разными частотами генерации. Все эти предварительные результаты открывают перспективы дальнейшего исследования, а также применения данного устройства. В заключение следует отметить, что аналогичное поведение Бозе-конденсата экситон-поляритонов было обнаружено в недавней работе [16].

Требуется дальнейшее развитие теории динамики Бозе-конденсата за пределами квазиклассического приближения уравнений Гросс–Питаевского, тем более, что на повестке дня стоит применение квантового состояния мБЭК для приложений, таких как резервуарный компьютер, обработка информации, машина Изинга и т.д. Использование магнонного Бозе-конденсата может реализовать такие его преимущества, как многочастичные квантовые переходы, что позволит кардинально увеличить точность и помехоустойчивость операций, а также чрезвычайно малый уровень теплового шума даже при комнатной температуре.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда # 22-12-00322-П, https://rscf.ru/project/22-12-00322/.

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

1. A. S. Borovik-Romanov, Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, and Yu. M. Mukharskii, “Long-lived induction signal in superfluid ^{3}He-B”, JETP Lett. **40**, 1033 (1984).
2. I. A. Fomin, “Long-lived induction signal and spatially nonuniform spin precession in 3He-B”, JETP Lett. **40**, 1037 (1984).
3. G. E. Volovik, “Twenty Years of Magnon Bose Condensation and SpinCurrent Superfluidity in ^{3}He-B”, J. Low Temp. Phys. **153**, 266 (2008).
4. Yu. M. Bunkov, “Spin superfluidity and magnons Bose–Einstein condensation”, Phys.-Uspekhi **53**, 848 (2010).
5. R. R. Gazizulin, Yu. M. Bunkov, V. L. Safonov, “Critical parameters of nuclear magnon Bose–Einstein condensation in systems with dynamical frequency shift”, JETP Lett. **102**, 876 (2015).
6. Yu. M. Bunkov, E. M. Alakshin, R. R. Gazizulin, A. V. Klochkov, V. V. Kuzmin, T. R. Safin, and M. S. Tagirov, “Discovery of the Classical Bose–Einstein Condensation of Magnons in Solid Antiferromagnets”, JETP Lett. **94**, 68 (2011).
7. M. S. Tagirov, E. M. Alakshin, Yu. M. Bunkov, R. R. Gazizulin, S. A. Zhurkov, L. I. Isaenko, A. V. Klochkov, A. M. Sabitova, T. R. Safin, and K. R. Safiullin, “Magnon BEC in antiferromagnets with Suhl-Nakamura interaction”, J. Low Temp. Phys. **175**, 167 (2014).
8. Yu. M. Bunkov, P. M. Vetoshko, A. N. Kuzmichev, G. V. Mamin, S. B. Orlinskiy, T. P. Safin, V. I. Belotelov, and M. S. Tagirov, “Long-Lived Induction Signal in Yttrium Iron Garnet”, JETP Lett. **111**, 62 (2020).
9. P. M. Vetoshko, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, A. A. Kholin, V. I. Belotelov, and Yu. M. Bunkov, “Bose–Einstein Condensation and Spin Superfluidity of Magnons in a Perpendicularly Magnetized Yttrium Iron Garnet Film”, JETP Lett. **112**, 299 (2020).
10. Yu. M. Bunkov and V. L. Safonov, “Magnon condensation and spin superfluidity”, J. Magn. Magn. Mater. **452**, 30 (2018).
11. S. Demokritov, V. Demidov, O. Dzyapko, G. A. Melkov, A. A. Serga, B. Hillebrands, and A. N. Slavin, “Bose–Einstein condensation of quasi-equilibrium magnons at room temperature under pumping”, Nature **443**, 430 (2006).
12. A. A. Serga, C. W. Sandweg, V. I. Vasyuchka, M. B. Jungfleisch, B. Hillebrands, A. Kreisel, P. Kopietz, and M. P. Kostylev, Phys. Rev. B **86**, 134403 (2012).
13. Yu. M. Bunkov, P. M. Vetoshko, T. R. Safin, and M. S. Tagirov, “Inverse Foldover” Resonance in an Yttrium Iron Garnet Film”, JETP Lett. **117**, 313 (2023).
14. 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 Le Si Dang, “Bose–Einstein condensation of exciton polaritons”, Nature **443**, 409 (2006)
15. K. G. Lagoudakis, B. Pietka, M. Wouters, R. Andre, and B. Deveaud-Plédran, “Coherent Oscillations in an Exciton-Polariton Josephson Junction”, Phys. Rev. Lett. **105**, 120403 (2010).
16. А. А. Деменев, Н. Н. Ипатов, В. Д. Кулаковский, С. С. Гаврилов, “Оптическая бистабильность мод размерного квантования в двумерной экситон-поляритонной системе”, Письма в ЖЭТФ **123**, 264 (2026) [A. A. Demenev, N. N. Ipatov, V. D. Kulakovsky, and S. S. Gavrilov, “Optical Bistability of Quantum Confined Modes in a Two-Dimensional Exciton–Polariton System”, JETP Lett. **123**, 244 (2026)].

17. Yu. M. Bunkov, P. M. Vetoshko, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, D. A. Samodelkin, "Permanent Bose–Einstein Condensate", JETP Lett. **123**, 119 (2026).
18. R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Basic Books, N.Y., 2011).
19. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, "Magnon Bose Einstein Condensation and Spin Superfluidity", J. Phys.: Condens. Matter **22**, 164210 (2010).
20. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, "Bose–Einstein Condensation of Magnons in Superfluid ^{3}He", J. Low Temp. Phys. **150**, 135 (2008).
21. A. S. Borovik-Romanov, Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, Yu. M. Mukharskiy, E. B. Poddyakova, and O. D. Timoveevskaya, "Distinctive features of a continuous NMR in 3He-B, due to a spin supercurrent", Sov. Phys. JETP **69**, 542 (1989).
22. Yu. M. Bunkov, "Magnonic superfluidity versus Bose condensation", Appl. Mag. Res. **51**, 1711 (2020).
23. P. W. Anderson and H. Suhl, "Instability in the motion of ferromagnets at high microwave power levels", Phys. Rev. **100**, 1788 (1955).
24. Y. K.Fetisov, C. E. Patton, and V. T. Synogach, "Nonlinear ferromagnetic resonance and foldover in YIG, Inadequacy of the classical model", IEEE Trans. magnet. **35**, 4511 (1999).
25. 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).
26. A. N. Litvinenko and V. V. Tikhonov, "Thermostable Tunable YIG Oscillator", Izvestiya of Saratov University. Physics **14**, 35 (2014); DOI: 10.18500/1817-3020-2014-14-1-35-41.
27. A. A. Nikitin, I. Yu. Tatsenko, M. P. Kostylev, and A. B. Ustinov, J. Appl. Phys. **135**, 123906 (2024); doi: 10.1063/5.0200249.
28. P. Sgarro, R. Ovcharov, R. Khymyn, S. Ghosh, A. A. Awad, 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).
29. 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", Mater. Res. Bull. **149**, 111691 (2022).