



БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИЯ НА ЛАЗЕРНЫХ ФОТОНАХ С УЧАСТИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, СИНТЕЗИРУЕМЫХ В ГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЕ

А. Колеров, д.ф.-м.н., Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва, kolerov-miet@yandex.ru

При облучении лазерным широкополосным излучением гетерогенной плазмы, легированной атомами металлов, в ней образуются углеродные нанотрубки. При дальнейшем воздействии того же лазера эти трубки генерируют когерентное излучение. По сути этот процесс аналогичен Бозе-конденсации на лазерных фотонах при комнатной температуре. В статье обосновано утверждается возможность его наблюдения с помощью внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС).

Исследования условий получения Бозе-Энштейновского конденсата (БЭК) [1] – нового агрегатного состояния материи – привели к новым интересным результатам в физике конденсированных сред. Это новое (пятое) состояние вещества открывает путь для получения сред в новых агрегатных состояниях, перспективных технологий, а также создания новой аппаратуры с новыми техническими и функциональными характеристиками и экспериментальными возможностями. Требования к выполнению условий для проведения экспериментальных исследований БЭК своеобразны – невысокая концентрация атомов в изучаемых объектах, сверхнизкие температуры, поддержание глубокого вакуума в магнитооптической кювете, в которой ведется изучение среды. Они осложняют эксперименты и требуют для их проведения больших финансовых затрат. Результаты наблюдений БЭК, полученные за прошедшее десятилетие, показали, что накопленный опыт проведения таких исследований пока еще не достаточен. Однако можно прогнозировать высокий потенциал теоретического и практического значения исследований БЭК для решения

BOSE-CONDENSATION ON LASER PHOTONS WITH THE INVOLVEMENT OF CARBON NANOTUBES SYNTHESIZED IN HETEROGENEOUS PLASMA

A. Kolerov, Doctor of Physical-Mathematical Sciences, National Research University of Electronic Technology, Moscow, kolerov-miet@yandex.ru

Upon the laser broad-band irradiation of heterogeneous plasma doped by metal atoms in the course of the thermal synthesis of carbon nanomaterials the occurrence of coherent radiation is observed. Having analyzed the known experimental papers on the observation of these processes and obtaining of Bose-Einstein condensate at the room temperature the assumption of observation of analogous phenomena in them is made. In this article it is reasonably stated that possibly under the conditions of intracavity laser spectroscopy (ILS) the Bose-condensation is observed on laser photons at the room temperature.

Research of the conditions under which the Bose-Einstein condensate (BEC) [1], new aggregate state of matter is obtained led to the new interesting results in the physics of condensed mediums. This new (fifth) state of substance opens the door to obtaining of mediums in new aggregate states, prospective technologies and design of new equipment with new technical and functional characteristics and experimental capabilities. Requirements to the meeting of these conditions for carrying out of the experimental study of BEC are peculiar: low concentration of atoms in the subjects under study, ultralow temperatures, maintaining of high vacuum in magneto-optical cell where the study of medium is performed; these requirements make experiments complicated and set up the considerable financial expenditures for their performance. The results of BEC observations which have been obtained over the last ten years showed that accumulated experience of such research carrying out is not sufficient as of yet. However, we can forecast high potential of theoretical and practical importance of BEC research



разных научно-технических и теоретических задач.

Анализ физических основ этого явления и накапливаемый со временем экспериментальный опыт позволят обосновать и найти более приемлемые условия для экспериментального изучения БЭК. Уже появились сообщения [1], в которых приводятся результаты получения БЭК с привлечением химических веществ.

Поиски новых сред для получения БЭК-состояния продвигаются достаточно быстро: если в первых опытах число используемых атомных сред насчитывало единицы элементов, то скоро, возможно, их количество увеличится. Интересным и неожиданным стало появление работы по исследованию БЭК при участии фотонного конденсата [2], хотя теоретики по ряду физических причин отвергали эти условия. Тем не менее, исследователи-экспериментаторы из Боннского университета показали, что это не совсем так. Их опытам с фотонным конденсатом, выполненным в 2010 году, посвящена работа в журнале Nature [2]. Авторы опубликовали результаты экспериментального изучения БЭК, полученного с привлечением лазерных фотонов и раствора органического красителя R6G в качестве хладагента. Они показали, что существенной разницы для реализации БЭК-состояния между средами, содержащими атомы, и средами, содержащими фотоны, - нет. Коренное отличие заключается только в том, что условия, при которых достигается БЭК-состояние с использованием фотонов, не требуют поддержания сверхнизких температур и использования магнитооптических ловушек. Оказалось, что БЭК-состояние может быть достигнуто и наблюдаться при комнатной температуре в лабораторных условиях!

Во всем мире (в частности и в России) уже несколько десятилетий проводились исследования, связанные с конденсацией спектра излучения перестраиваемых широкополосных лазеров [3, 5-14]. Эти лазеры используются в анализе газов и плазменных сред методом внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС). В качестве изучаемых объектов выступали газы и слабо ионизированная среда с привлечением легирующих добавок атомов металла (натрий, цезий и др.). Поэтому экспериментальным исследованиям подвергались плазменные объекты (гетерогенная плазма, в которой атомы металла переводились в слабо возбужденное состояние). Эти объекты обычно размещались в резонаторе ВРЛ-спектроанализатора. Конструкция

for the solution of different scientific-technical and theoretical tasks.

Analysis of the physical basis of this phenomenon and experimental experience accumulated over the time will make it possible to substantiate and find more acceptable conditions for the experimental study of BEC. The messages have occurred where the results of obtaining of BEC with the involvement of chemical substances are given [1].

Search of new mediums in order to obtain BEC state makes progress quite fast: if in the initial experiments the amount of used atomic mediums was only few elements, perhaps their amount will increase soon. Occurrence of the paper on study of BEC with the involvement of photon condensate [2] became interesting and unexpected, although theorists rejected these conditions for a variety of physical reasons. Nevertheless, researchers-experimenters from the University of Bonn showed that it is not quite so. Their experiments with photon condenser carried out in 2010 were published in NATURE magazine [2]. Authors published the results of experimental study of BEC obtained with the involvement of laser photons and solution of R6G organic dye as the cooling agent. They showed that there is no substantial difference between mediums containing atoms and mediums containing photons for the implementation of BEC states. The fundamental difference lies only in the fact that the temperature at which BEC state is achieved with the use of photons does not require the generation of ultralow temperatures and application of magneto-optical traps. It turned out that BEC state can be achieved and observed at the room temperature under laboratory conditions!!!

In the whole world (as well as in Russia particularly) the research connected with the condensation of radiation spectrum of tunable broad-band lasers has been carried out for several decades already [3, 5-14]. These lasers are used when analyzing gases and plasma mediums by the method of intracavity laser spectroscopy (ILS). Gases and poorly-ionized medium with the involvement of dope additives of metal atoms (sodium, cesium etc.) were used as the subjects under study. Therefore, plasma subjects (heterogeneous plasma where the metal atoms were transferred into the poorly-excited state) were submitted to the experimental research. These subjects were usually located in the resonator of IL-spectrum analyzer. Construction of the experimental facility has a number of peculiarities: resonator mirrors are made on the basis of peculiar geometry and laser active mediums have broad homogeneously-broadened luminescence band. Such construction excludes the potential



экспериментальной установки имеет ряд особенностей: зеркала резонаторов выполнены по своеобразной геометрии, и лазерно-активные среды обладают широкой однородно-уширенной полосою люминесценции. Такая конструкция исключает возможность возникновения паразитной интерференции на внешних гранях оптических элементов, находящихся в оптическом тракте лазерного резонатора.

Одновременно с публикацией работ по изучению материи в состоянии БЭК стали появляться близкие по смыслу работы, авторы которых учитывали влияние такого состояния (квазисостояния) среды [4] на возникновение когерентного характера излучения. Это открывало возможности использования новых явлений в решении некоторых прикладных задач. Так, работа [3] была посвящена получению когерентного поверхностного излучения и лазерной генерации на углеродных наноматериалах с участием гетерогенной плазмы, в которой осуществлялась процедура термического синтеза металлоуглеродных нанотрубок (МУНТ). В ряде опубликованных работ сообщается о достигнутых условиях получения процесса вынужденного когерентного излучения [3, 6, 7]. Использование иных прикладных и функциональных возможностей лазерной аппаратуры с помощью высокоразрешающих зондовых микроскопов и ВРЛ-спектроанализаторов увеличило ряд способов получения и наблюдения новых сред [3, 7]. В этих работах приведены результаты изучения микро- и макроструктуры лазерных сред, созданных в условиях, отличных от традиционных.

Исследование фотонного БЭК во многом перекликается с вопросами изучения газов и гетерогенной плазмы в условиях ВРЛ-спектроскопии. В такой плазме термически синтезируются металлоуглеродные наноматериалы, которые перспективны для ряда практических приложений. Попытаемся разобраться с особенностями этих экспериментов и сравним их с условиями реализации фотонного БЭК [2]. Данные, опубликованные в работах [3, 5-14], во многом адекватны данным, полученным в экспериментах, проводимых в Боннском университете [2]. Качественно сравним условия осуществления экспериментов по получению фотонного БЭК в лабораториях при комнатной температуре [2] с условиями проведения опытов с гетерогенной плазмой в резонаторе ВРЛ-спектроанализатора [3, 5-14]. Сравним и оптические элементы конструкций экспериментальных установок, на которых проводились эти опыты. Для наблюдения фотонного БЭК мы

occurrence of spurious interference on external edges of optical elements located in the optical path of laser resonator.

Simultaneously with the publication of papers on the study of matter in BEC state, the papers similar in content started to occur; authors of these papers took into account the influence of such state (quasi-state) of medium [4] on the occurrence of coherent radiation. It opened up possibilities to use the new phenomena in the solution of some applied tasks. So, the paper [3] was devoted to the obtaining of coherent surface radiation and laser generation on carbon nanomaterials with the involvement of heterogeneous plasma where the procedure of thermal synthesis of metal-carbon nanotubes (MCNTs) was performed. Conditions of obtaining of the process of induced coherent radiation were achieved in a number of published papers [3, 6, 7]. Implementation of new applied and functional capabilities of laser equipment using the high-resolution probe microscopes and IL-spectrum analyzers expanded the opportunities to obtain and observe new mediums [3, 7]. The results of study of micro- and macrostructure of new laser mediums created under the conditions which differ from the traditional ones are given in these papers.

The study of photon BEC has many aspects in common with the issues of study of gases and heterogeneous plasma under the conditions of IL-spectroscopy. Metal-carbon nanomaterials which are prospective for a number of practical applications are thermally synthesized in such plasma. Let us try to examine the peculiarities of these experiments and compare them with the conditions of implementation of the photon BEC [2]. Data published in the papers [3, 5-14] are adequate to the data obtained in the experiments which were carried out in the University of Bonn in many aspects [2]. Let us qualitatively compare the conditions of carrying out of the experiments on obtaining of photon BEC under laboratory conditions at the room temperature [2] with the conditions of carrying out of the experiments with heterogeneous plasma in resonator of IL-spectrum analyzer [3, 5-14]. Let us also compare optical elements of the constructions of experimental facilities on which these experiments were carried out. We used the facility flow diagram of which is shown in Fig. 1 for the observation of photon BEC. Interaction of the broadband laser luminous flux of radiation from MCNT thermally synthesized in the carbon heterogeneous plasma [3, 5-14] is illustrated in Fig. 2.

Research carried out on the used facility made it possible to record interesting data which is analogous to the results given in the paper [2]. The difference



использовали установку, блок-схема которой изображена на рис.1. Взаимодействие широкополосного лазерного светового потока излучения с МУНТ, термически синтезируемой в углеродной гетерогенной плазме [3, 5-14], иллюстрирует рис.2.

Проведенные на использованной установке исследования позволили зарегистрировать интересные данные, которые аналогичны результатам, приведенным в работе [2]. Отличие экспериментов состоит лишь в том, что в [5-14] мы использовали кристалл гадолиний-скандий-галлиевого граната с ионами хрома (или другие лазерные среды), реализующий генерацию широкополосного излучения, в то время как авторы работы [2] использовали раствор красителя. Конфигурация зеркал ($R \approx 0,5$ м) в резонаторах близка к конфокальной геометрии с базовым расстоянием между ними около 0,5 м. Между зеркалами по обе стороны от лазерного кристалла были помещены две диафрагмы диаметром $\leq 1-2$ мм. Они использовались для того, чтобы выделить одну или несколько аксиальных мод лазерного излучения. Кроме того, что внутри резонатора ВРЛ-спектроанализатора были установлены диафрагмы, внутри него также осуществлялся процесс термического синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) в гетерогенной

between these experiments lies only in the fact that in [5-14] we used the crystal of gadolinium-scandium-gallium garnet with chrome ions (or other laser mediums) which performs the generation of broadband radiation and authors of the paper [2] used the dye solution. Configuration of the mirrors ($R \approx 0.5$ m) in resonators is close to the confocal geometry with the locating distance of about 0.5 m between them. Two diaphragms with the diameter $\leq 1-2$ mm were located between the mirrors on each side of the laser crystal. They were used in order to mark out one or several axial modes of laser radiation. Besides the fact that the diaphragms were installed inside of IL-spectrum analyzer, also the process of thermal synthesis of carbon nanotubes (CNTs) in heterogeneous plasma was performed inside of it. And as the subsequent measurements showed, the linear dimensions of the synthesized CNTs turned out to be commensurable with the wavelength of laser light falling on them. Then, in the course of the experiment the localization and concentration of the falling photon flux take place in the volume of synthesized CNTs. Let us compare this condition with the similar condition emphasized by authors of the paper [2] as one of the main conditions of the experiment carrying out (reaching of photon BEC at the room temperature).

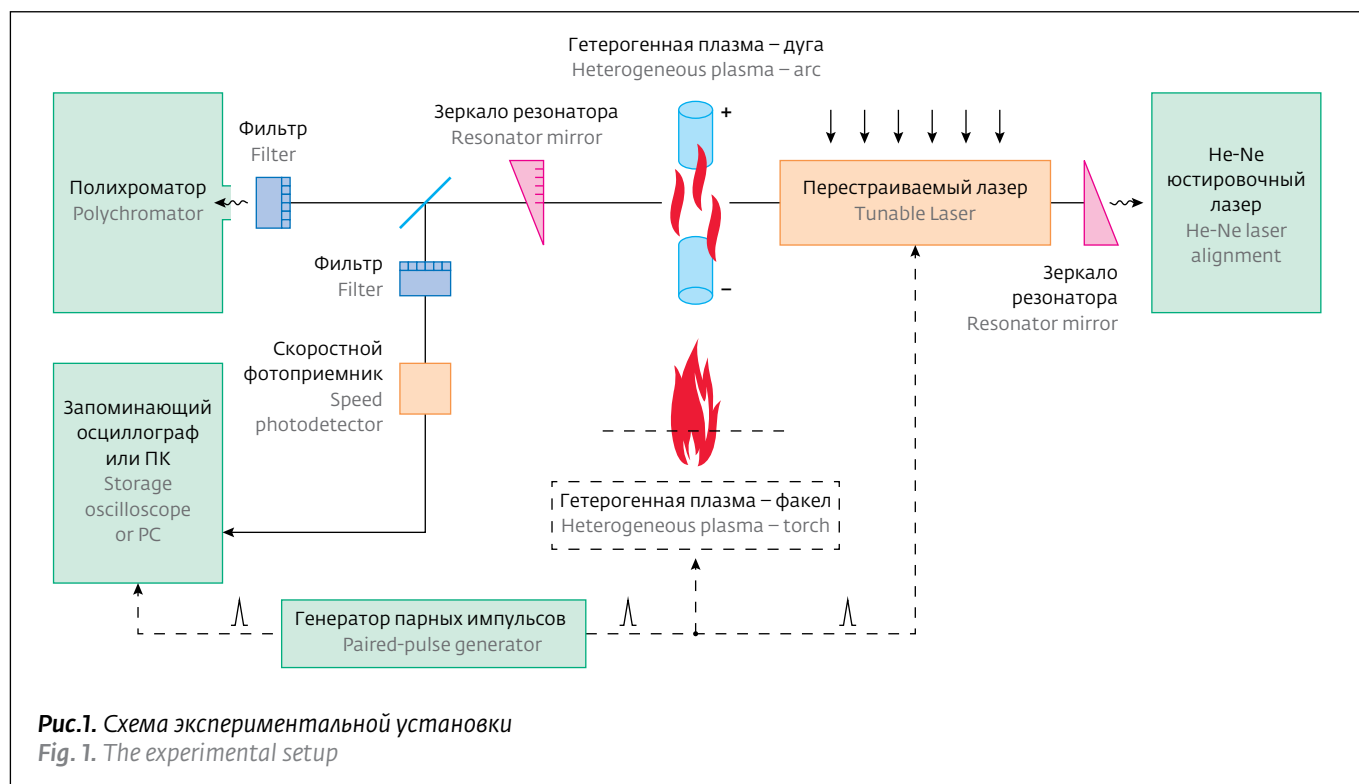


Рис.1. Схема экспериментальной установки
Fig. 1. The experimental setup

плазме. Причем, как показали последующие измерения, линейные размеры синтезируемых УНТ оказались соизмеримы с длиной волны падающего на них лазерного света. Далее в ходе эксперимента в объеме синтезируемых УНТ происходит локализация и концентрация падающего потока фотонов. Сравним это условие с подобным условием, подчеркнутым авторами работы [2] как одного из основных условий проведения эксперимента (достижения фотонной БЭК при комнатной температуре).

Спектральные коэффициенты отражения сферических зеркал резонатора в экспериментах [5-14] в полосах генерации $\Delta\lambda \approx 0,6-1,3$ мкм составляли около 99,9%. При необходимости расширить или сместить эту полосу использовались другие зеркала резонатора, с высокими спектральными коэффициентами отражения излучения, задаваемого используемыми перестраиваемыми лазерами. Задние грани зеркал установки имели углы скоса в интервале 5-15° к оптической оси резонатора. Такая конструкция исключает возможность возникновения паразитной интерференции излучения на гранях оптических элементов. Это является стандартным условием осуществления ВРЛ-спектроскопии, используемым для получения "гладкого" спектра излучения и достижения высокого спектрального разрешения при регистрации спектров

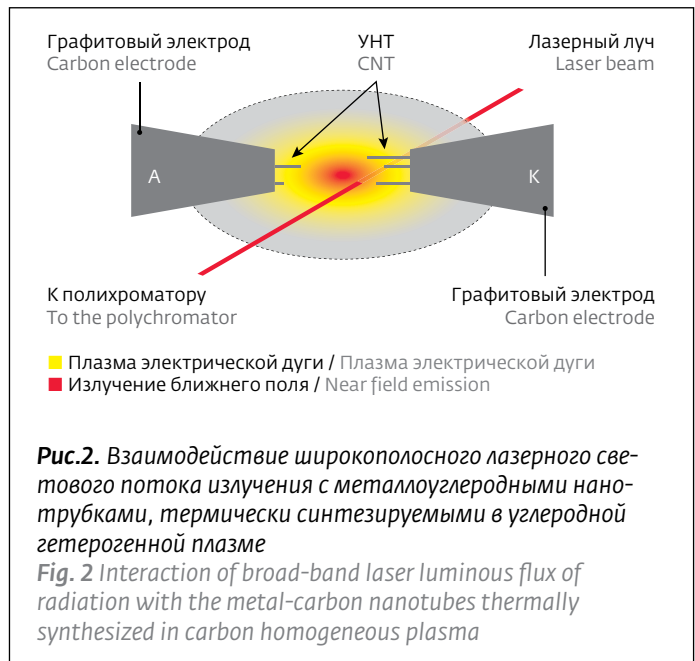
Spectral reflectivity of the resonator spherical mirrors in the experiments [5-14] in the generation bands $\Delta\lambda \approx 0.6-1.3$ μm was about 99.9%. When the necessity to broaden or shift this band occurred other resonator mirrors with high spectral reflectivity of radiation set by the used tunable lasers were used. Back edges of the facility mirrors had angles of bevel within the range 5-15° to the optical axis of resonator. Such construction excludes the potential occurrence of radiation spurious interference on the optical element edges. It is the standard condition for the performance of IL-spectroscopy used in order to obtain the "smooth" radiation spectrum and achievement of high spectral resolution upon the detection of absorption (or emission) spectrums of gas or plasma subjects. Laser quantron together with optical elements and xenon pump lamp was cooled down to the room temperature. Although, in case of use of alexandrite crystal doped by chrome ions as the laser medium we had to heat it up to the temperatures of about 100 °C and higher. Heating up of alexandrite crystal increased the efficiency of crystal laser generation and influenced on the broadening of generation spectral band. Then for the cooling of elements the thermostat with flow-through movement of cooling agent and accurate adjustment of temperature conditions was used in the facility.

Researchers of the University of Bonn used the resonator with spherical mirrors ($R \approx 1$ m) and spectral reflectivity close to 100% (as well as in the papers [5-14])

поглощения (или эмиссии) газовых или плазменных объектов. Лазерный квантрон вместе с оптическими элементами и ксеноновой лампой накачки охлаждались до комнатной температуры. Хотя, в случае использования в качестве лазерной среды кристалла александрита, легированного ионами хрома, приходилось нагревать его до температур около 100°C и выше. Нагрев кристалла александрита увеличивал эффективность лазерной генерации кристалла и влиял на расширение спектральной полосы генерации. Тогда для охлаждения элементов использовался термостат с проточным движением хладагента и точной регулировкой температурного режима в используемой установке.

У исследователей из Боннского университета в экспериментальной установке использован резонатор со сферическими зеркалами ($R_{\text{кривизны}} \approx 1 \text{ м}$) со спектральным коэффициентом отражения, близким к 100% (как и в работах [5-14]), расположенные на расстоянии $L \approx 1,5 \text{ мкм}$ друг от друга. Это позволяло им выделять несколько (около 7) продольных мод излучения и осуществлять локальную концентрацию фотонов в выделенном объеме резонатора. Между зеркалами заливался раствор органического красителя "Родамин 6G", молекулы которого возбуждались излучением аргонового лазера ($P \leq 2,0 \text{ Вт}$). Тепловая энергия, выделяемая при осуществлении спектральной конверсии и преобразовании излучения из зеленой области в желтый интервал спектра, снижалась и охлаждалась до комнатной при прокачке раствора красителя с помощью гидropомпы. То есть это была стандартная схема преобразования излучения лазера накачки при получении перестраиваемого спектра излучения на органических красителях, растворенных в этиленгликоле или другой жидкостной матрице.

В экспериментах [3, 5-14], использовалась система регистрации, позволяющая фиксировать изменение динамических характеристик импульсов излучения и их спектры после прохождения высоко разрешающего полихроматора (разрешение $R \approx 10^6$ и дисперсия $D \approx 0,01-1 \text{ нм/мм}$). Система индикации световых потоков имела выход на ПК и спектрофотометр. При взаимодействии потока широкополосного перестраиваемого излучения с гетерогенной плазмой происходил процесс термического синтеза металлоуглеродных наноматериалов (металлоуглеродные нанотрубки – МУНТ). Их появление в резонаторе ВРЛ-спектроанализатора приводило к разнообразным оптическим явлениям (изменялась динамика



located at the distance $L \approx 1.5 \text{ }\mu\text{m}$ from each other in the experimental facility. It made it possible for them to mark out several (about 7) longitudinal radiation modes and perform the local concentration of photons in the resonator assigned volume. Rhodamine 6G organic dye solution was poured out between the mirrors, its molecules were excited by the radiation of argon laser ($P \leq 2.0 \text{ W}$). Heat energy which was released upon the spectral conversion and transformation of radiation from the green region to the yellow spectrum interval was decreased and cooled down to the room temperature upon the pumping of dye solution using the hydraulic pump. In other words, it was the standard scheme of pumping laser radiation transformation upon the obtaining of tunable radiation spectrum on organic dyes dissolved in ethylene glycol or other liquid matrix.

The detecting system which makes it possible to register the change of dynamic characteristics of radiation pulses and their spectrums after passing the high-resolution polychromator (resolution $R \approx 10^6$ and dispersion $D \approx 0.01-1 \text{ nm/mm}$) was used in the experiments [3, 5-14]. Indication system of luminous fluxes had PC output and spectrophotometer. Upon the interaction of the flux of broad-band tunable radiation with heterogeneous plasma the process of thermal synthesis of metal-carbon nanomaterials (metal-carbon nanotubes – MCNT) took place. Their occurrence in the resonator of IL-spectrum analyzer resulted in various optical phenomena (the dynamics of detected pulse changed, the occurrence of coherent generation on carbon nanotubes was observed [3], the occurrence of

регистрируемого импульса, наблюдалось возникновение когерентной генерации на углеродных нанотрубках [3], фиксировалось возникновение когерентного лазерного сверхизлучения Дике [15], наблюдалось преобразование лазерного излучения с возникновением условий фотонного БЭК (как мы считаем), фиксировался нелинейный характер наблюдаемых оптических явлений и др.

Далее, на рис.3, приведены характерные изменения генерационных спектров, наблюдаемых в ходе термического синтеза УНТ в гетерогенной плазме. Генерационные спектральные участки обусловлены появлением когерентного излучения, возникающего в Ферстеровской области ("МУНТ-мишень") при ее облучении внешним лазерным излучением, перестраиваемым по частоте. На рис.3б и 3в мы наблюдаем конкуренцию двух эффектов – возникновение излучения с длиной волны 783,3 нм и длиной волны 785,3 нм. Рис.3в и 3г иллюстрируют появление описанных конкурирующих эффектов в двух экспериментах, проведенных в разное время при разных условиях. Полученные нами результаты (см. рис.3) аналогичны данным, опубликованным в журнале Nature [2].

Фрагменты спектров, приведенные на рис.3, характеризуют изменение спектральной интенсивности при изучении гетерогенной плазмы, легированной добавками атомов церия, термически синтезируемых в стенки УНТ и, возможно, влияющих на проявление фотонного БЭК-состояния. Полученные в настоящей работе результаты характеризовались изменением спектральной интенсивности спектров излучения [9] и изменением динамики потока генерационных импульсов [3].

В качестве примера на рис.4 изображена зависимость изменения спектральной интенсивности излучения, фиксируемой из области регистрации оптического сигнала из района ближнего поля (или области, прилегающей к зонду сканирующего микроскопа ближнего поля [3, 6, 7]), находящейся между зондом микроскопа (роль зонда выполняла УНТ) и металлоуглеродной мишенью [3]. Эта область облучалась потоком света перестраиваемого лазера, а сканирование зонда осуществлялось через кратные интервалы δl (см. рис.4) с помощью юстировочного винта микростолика. Такая зависимость зарегистрирована малоинерционным фотоприемником для промежутка между зондом и мишенью: кривая 1 соответствует результатам, полученным для

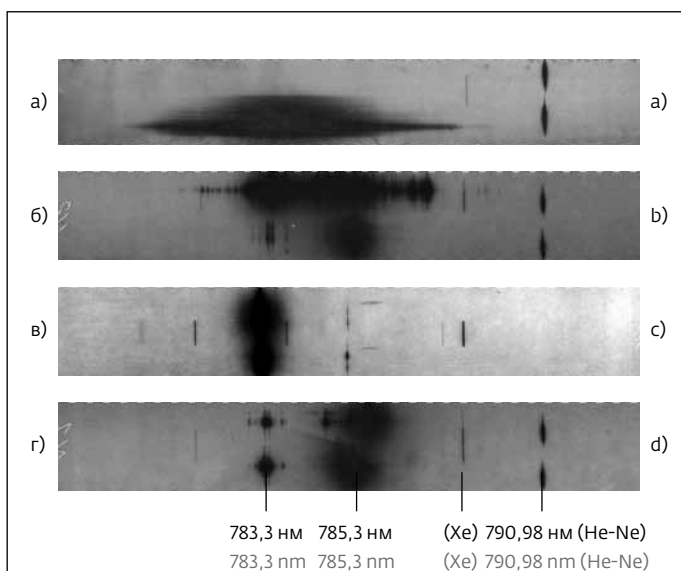


Рис.3. Возникновение фотонного БЭК состояния (генерационные спектральные участки, обусловленные возникновением когерентного излучения, возникающего в Ферстеровской области): а) – исходный спектр лазерной генерации, б)–г) – спектры когерентной генерации, по горизонтали приведены значения длин волн для калибровки шкалы спектра

Fig. 3 Occurrence of photon BEC state (generation spectral regions caused by the coherent radiation occurring in Förster region): а) initial spectrum of laser generation; б)–d) spectrums of coherent generation (the values of wavelengths for spectrum scale calibration are specified horizontally)

coherent laser Dicke superradiance was detected [15], the transformation of laser radiation with the occurrence of photon BEC conditions was observed (as we believe), the non-linear character of observed optical phenomena was detected etc.).

The typical changes of generation spectrums observed in the course of thermal synthesis of CNTs in heterogeneous plasma are given below (Fig. 3). Generation spectral regions are caused by the coherent radiation occurring in Förster region (MCNT-target) upon its irradiation by the external laser source tunable by frequency. We observe the competitiveness of two effects in Fig. 3b and Fig. 3c: occurrence of the radiation with wavelength of 783.3 nm and wavelength of 785.3 nm. The occurrence of described competitive effects in two experiments carried out at different times under different conditions is illustrated in Fig. 3c, Fig. 3d. The results which we obtained (Fig. 3) are analogous to the data published in the paper in NATURE magazine [2].

Fragments of the spectrums given in Fig. 3 characterize the change of spectral intensity upon the study of heterogeneous plasma doped by the additions of cerium atoms thermally synthesized into the walls



исходного потока излучения, кривая 2 – для увеличенного расстояния, кривая 4 – для уменьшенного, кривая 3 – соответствовала оптимальному расстоянию. Подбор оптимального расстояния определен экспериментально (качественно). Приемник устанавливался после высокоразрешающего полихроматора, а сигнал фиксировался на экране запоминающего осциллографа, который затем фотографировался, а полученные данные обрабатывались.

Анализ известных работ и экспериментальные результаты, полученные в данной работе, позволяют выдвинуть в итоге следующие предположения о наблюдаемом явлении БЭК:

- Экспериментальная установка, примененная исследователями из Бонна [2] для регистрации фотонного БЭК-состояния, мало чем отличается от ВРЛ-спектроанализатора, применяемого для изучения спектров поглощения (эмиссии) гетерогенной плазмы, легированной атомами церия, термически внедренных в стенки МУНТ.
- В рассмотренных случаях использовались в качестве когерентных источников излучения перестраиваемые лазеры с однородно уширенным контуром усиления, возбуждаемые

of CNTs and potentially influencing on the development of photon BEC state. The results obtained in this paper were characterized by the change of spectral intensity, radiation spectrums [9] and change of the dynamics of generation pulse stream [3].

The dependence of change of the radiation spectral intensity recorded from the area of detection of optical signal from near-field region (or region which is adjacent to the near-field scanning microscope probe [3, 6, 7]) which is situated between the microscope probe (CNT played the role of probe) and metal-carbon target is displayed in Fig.4 as the example [3]. This area was irradiated by the luminous flux of tunable laser and the probe scanning was accomplished in fold intervals δl (Fig. 4) using the adjusting screw of micropillar. Such dependence was detected by the quick-response photodetector for the interval between probe and target: curve 1 corresponds to the results obtained for the initial radiation flux, curve 2 – for the increased distance, curve 4 – for the decreased distance, curve 3 corresponds to the optimal distance. Selection of the optimal distance was determined experimentally (qualitatively). Detector was installed after the high-resolution polychromator and the signal was detected on the screen of storage oscilloscope which then was photographed and obtained data was processed.

оптическими источниками излучения при комнатной температуре.

- Видимо, все наблюдаемые и регистрируемые явления связаны между собой одним основным условием – обеспечение когерентности потока излучения и нелинейным изменением динамики потоков излучения.
- Дальнейшее изучение этих явлений расширит знания о фотонном БЭК-состоянии (если оно существует или возникает!? как описано в работе [2]) и позволят наблюдать другие эффекты, появляющиеся при облучении лазерным широкополосным излучением гетерогенной плазмы, легированной атомами металлов.
- В работе [2] не приведено исчерпывающих характеристик потоков излучения, характеризующих динамические и спектральные параметры излучения в состоянии БЭК и возможные нелинейные проявления.
- Все эти (и последующие) исследования позволят найти и выработать условия создания нового класса лазерно-активных сред и их практическое применение для разнообразных задач в широком спектральном интервале (включая УФ- и рентгеновский диапазоны) с разными временными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каттерле В. Когда атомы ведут себя как волны. – УФН, т.173, №12, с.1339.
2. Weitz V. et al. Bose-Einstein condensation of photons in an optical microcavite. – Nature, 2010, v.468, p.545.
3. Колеров А.Н. Гетерогенная плазма. Применение гетерогенной плазмы для нанотехнологий. – LAP Lambert Academic Publishing (2012-10-18).
4. Аверченко В.А. и др. Высокотемпературная БЭК поляритонов: реализация в условиях ВРЛ накачки вещества. – Квантовая электроника, 2006, т. 36, №6, с.532.
5. Колеров А.Н. Когерентное излучение от углеродных нанотрубок при их лазерном возбуждении. – Наноинженерия, 2012, №12, с.54.
6. Колеров А.Н. Изучение проблем создания генераторов когерентного излучения на углеродных нанотрубках. – Наноинженерия, 2013, №8, с.3-7.
7. Жариков Е.В., Колеров А.Н и др. Лазерный спектроанализатор на основе кристалла ГСГГ:Cr³⁺. – ДАН СССР, т.285, №1, с.92.
8. Колеров А.Н. Влияние светоэрозионной плазмы, находящейся в резонаторе перестраи-

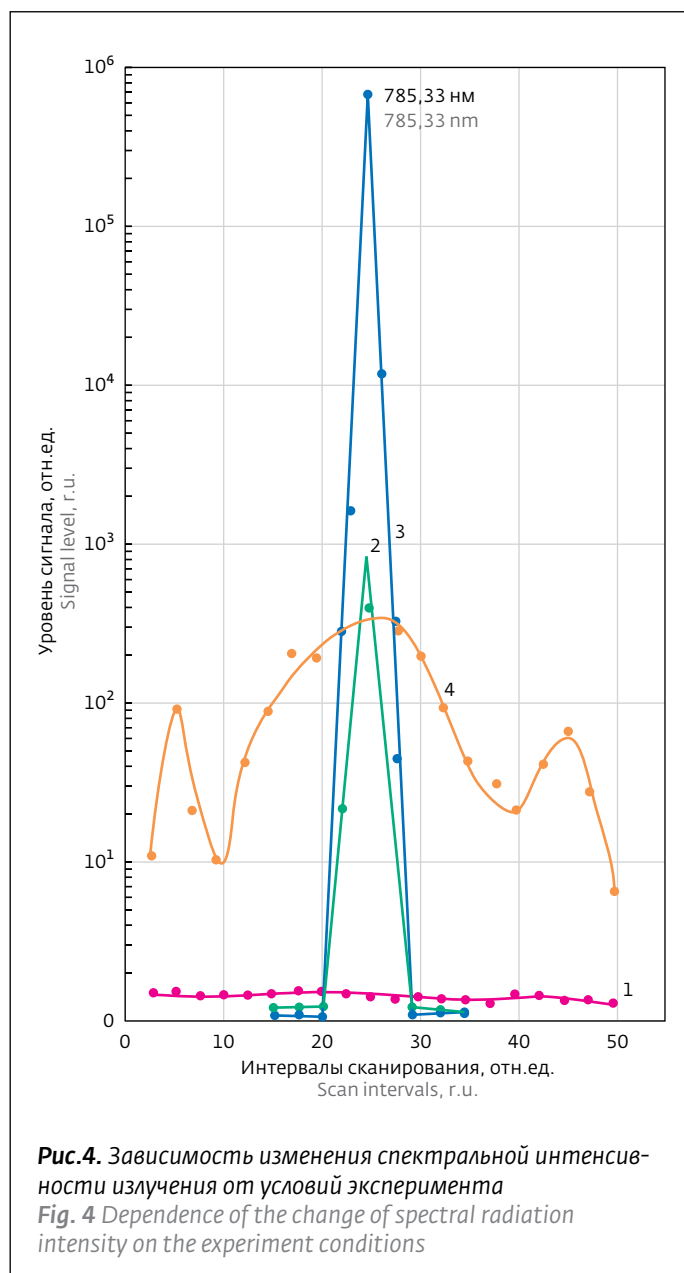


Рис.4. Зависимость изменения спектральной интенсивности излучения от условий эксперимента
Fig. 4 Dependence of the change of spectral radiation intensity on the experiment conditions

Analysis of the known papers and experimental results obtained in this paper allows making the following assumptions on the observed phenomenon of BEC:

- Experimental facility which was used by the researchers from Bonn [2] for the detection of photon BEC state is close to IL-spectrum analyzer which was used for the study of absorption (emission) spectrums of heterogeneous plasma doped by cerium atoms thermally synthesized into MCNT walls.
- Tunable lasers with homogeneously broadened amplification loop which were excited by the optical radiation sources at the room temperature



- ваемого лазера, на характеристики его излучения. – Квантовая электроника, 2002, т. 32, №6, с.528.
9. **Колеров А.Н.** Особенности конденсации спектра излучения перестраиваемых лазеров. – Квантовая электроника, 1988, т.15, №3, с.512.
 10. **Колеров А.Н.** Аномалия спектра излучения и кинетики импульса генерации в лазерном кристалле $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$. – ПЖТФ, 1987, т.13, №4, с.227.
 11. **Колеров А.Н.** Использование лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ для внутрирезонаторной лазерной спектроскопии. – ЖПС, 1986, т.44, №3, с.127.
 12. **Колеров А.Н.** Внутрирезонаторные лазерные спектроанализаторы на LiF с ламповым возбуждением центров окраски. – Квантовая электроника, т.15, №9, 1988, с.816.
 13. **Распопов Р.А. и др.** Внутрирезонаторная лазерная спектроскопия с использованием лазеров на ЦО в кристалле NaCl-ОН. – Квантовая электроника, 1999, т.6, №6, с.618.
 14. **Дубинский М.А. и др.** Получение квазинепрерывной генерации на $\text{KZnF}_3:\text{Cr}^{3+}$. – Квантовая электроника, 1986, т.13, №12, с.986.
 15. **Dicke R.H.** Phys. Rev., 1954, v.93, p.99.
- were used as the coherent radiation sources in considered cases.
- Apparently, all observed and detected phenomena are connected with each other by one basic condition – provision of the coherence of radiation flux and non-linear change of dynamics of radiation fluxes.
 - Further study of these phenomena will expand the knowledge of photon BEC state (if it exists or mechanism of its occurrence corresponds to the description in the paper [2]) and make it possible to observe other effects occurring upon the laser broad-band irradiation of heterogeneous plasma doped by metal atoms.
 - There are no exhausting characteristics of radiation fluxes which characterize the dynamic and spectral parameters of radiation in BEC state and potential non-linear developments in the paper [2].
 - The results of research carried out and planned in future will make it possible to find and develop the conditions of creation of the new class of laser active mediums. Perhaps, they will be applied within the broad spectral interval (including UV and X-ray ranges) with different temporary characteristics in solution of various tasks.