



ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОВОГО ТИПА ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАУКОЕМКИХ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ.

ЧАСТЬ I

В. П. Лопасов, д.ф.-м.н., *lopas@iao.ru*, Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, И. В. Ивонин, *iiv@phys.tsu.ru*, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Создана физическая основа генерации магнитомультипольного (ММ) излучения в диапазоне 250–900 нм в неравновесной системе "коллектив полей + молекулярный газ". Обоснован механизм двумерной обратной связи между энергиями квадратичных эффектов Штарка на низкочастотном электродипольном (стартовом) и Зеемана на высокочастотном магнитном мультипольном (рабочем) колебательно-вращательных (КВ) переходах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционное представление генерации лазерного излучения базируется на физике лазера, состоящего из трех элементов: рабочая среда, резонатор и система накачки. Характеристики этих элементов описываются по отдельности, а взаимодействие поля накачки со средой в резонаторе лазера описывается в рамках квантово-электродинамического (КЭД) подхода к взаимодействию электромагнитного (э/м) излучения с веществом [1, 2]. Ключевую роль играет физическая основа, в рамках которой зарождается механизм обратной связи (ОС) в резонаторе между вынужденным излучением на частоте рабочего перехода и молекулами (атомами) активной среды. Генерация самовозбуждается в момент времени, когда между состояниями электродипольного (ЭД) перехода среды на частоте одной из мод резонатора достигнута пороговая инверсия населенности. Каждая характеристика ЭД излучения формируется независимо.

В последние годы физика лазеров пополнилась новыми разделами: волоконные лазеры [3], мощные лазеры на тонких дисках, имеющих форму

GENERATION OF A NEW-TYPE LASER RADIATION FOR SOLVING KNOWLEDGE-BASED APPLIED PROBLEMS. PART I

V.P. Lopasov, Dr. of Sc.(Phys. and Math.), *lopas@iao.ru*, V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, I.V. Ivonin, Dr. of Sc.(Phys. and Math.), *iiv@phys.tsu.ru*, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

A physical basis for the generation of magnetomultipole (MM) radiation in the wavelength range 250–900 nm in the "set of fields + molecular gas" non-equilibrium system is created. The mechanism of the two-dimensional feedback between the energies of the quadratic Stark effect at the low-frequency electric dipole (starter) and the Zeeman effect at the high-frequency magnetic multipole (working) vibrational-rotational (VR) transitions is substantiated.

1. INTRODUCTION.

Traditional representation of the laser radiation generation is based on the physics of a laser consisting of three elements: working medium, resonator and pumping system. Characteristics of these elements are described separately, and interaction of the pumping field with the medium in the laser resonator is described in the frameworks of the quantum-electrodynamic (QED) approach to the interaction of the electromagnetic (e/m) radiation with the matter [1, 2]. The physical basis in the frameworks of which the feedback (FB) in the resonator between the stimulated radiation at the working transition frequency and the molecules (atoms) of the active medium is launched, plays a key role. Generation is self-excited at the time moment when the threshold inversion of population has been reached between the states of the electrodipole (ED) transition of the medium at the frequency of one of the modes of the resonator. Each characteristic of the ED radiation is formed independently.

Last years, laser physics was added by new branches: fiber lasers [3], powerful lasers on thin discs shaped like cylindrical rods [4], quantum-cascade lasers, where the active medium is based on three coupled quantum wells [5], a supergrid [6] or a chipped supergrid [7]. In all aforementioned cases, generation of laser radiation is



цилиндрических стержней [4], квантово-каскадные лазеры, где основой активной среды являются три связанных квантовых ямы [5], сверхрешетка [6] или чирпированная сверхрешетка [7]. Во всех перечисленных случаях генерация лазерного излучения самовозбуждается на естественных ЭД переходах молекул (атомов) в подготовленной активной среде [1]. Такое лазерное излучение имеет электродипольную природу, когерентность 1-го порядка [8], а его распространение в атмосфере зависит от закона Кулона, который способствует росту низко- и высокочастотных флюктуаций интенсивности излучения в среде.

Недостаток ЭД излучения в том, что его распространение в атмосфере сильно зависит от ее аэрозольно-молекулярно-ионного состава, включая облака, дымки, туман, дождь, снег (они уменьшают сигнал/шум лазерного канала). При этом турбулентность атмосферы искажает до распада волновой фронт излучения из-за низко- и высокочастотных флюктуаций интенсивности излучения. Помехоустойчивость в атмосфере лазерных систем связи, навигации и других средств на основе ЭД излучения недостаточна уже для трасс, превышающих 1–5 км [9–12].

Решение наукоемких коммуникационных, аэрокосмических, атмосферно-оптических и др. задач требует качественно нового уровня устойчивости волнового фронта лазерного излучения на больших атмосферных трассах, в том числе с большой магнитной индукцией в различных объектах. Актуальным стало освоение новой глубины знаний взаимодействия э/м излучения с веществом для генерации магнитомультипольного (ММ) излучения на ММ электронном переходе, подготовленном в области *рабочего* КВ перехода [13].

Новое представление генерации излучения базируется на физике лазера, состоящего из двух элементов: молекулярный газ и бигармоническое излучение (БИ) накачки с экстремальными характеристиками. Изменение характеристик этих элементов описывается в рамках квантово-электромагнитодинамического (КЭМД) подхода к взаимодействию э/м излучения с веществом [13, 14] на этапе $\approx 10^{-12}$ с, меньше длительности упругого столкновения молекул. Генерация ММ излучения самовозбуждается в ансамбле наночастиц электрон-ион в момент накопления пороговой диамагнитной энергии на высоковозбужденном состоянии приготовленного ММ электронного перехода. Все характеристики ММ излучения формируются взаимозависимо.

self-excited on the natural ED transitions of molecules (atoms) in the prepared active medium [1]. Such laser radiation has an electrodipole nature, coherence of the first order [8], and its propagation in the atmosphere depends on the Coulomb law, which favors increase of low- and high-frequency fluctuations of radiation in the medium.

The disadvantage of ED radiation is that its propagation in the atmosphere depends strongly on its aerosol-molecular-ion composition, including clouds, haze, fog, rain, snow (they reduce the signal-to-noise ratio of the laser channel). At the same time, turbulence of the atmosphere distorts the wave front of radiation up to destruction due to low- and high-frequency fluctuations of the intensity. Noise immunity of laser communication and navigation systems, and other tools in the atmosphere based on ED radiation is insufficient for the paths exceeding 1–5 km [9–12].

Solution of the knowledge-based communication, aerospace, atmospheric-optical and other problems requires a qualitatively new level of stability of the wavefront of laser radiation on long atmospheric paths, including with large magnetic induction in various objects. The development of a new depth of knowledge of the interaction of e/m radiation with matter for the generation of magnetomultipole (MM) radiation at the prepared MM electronic transition has become topical [13]. All characteristics of the MM radiation are formed interdependently.

The probability of MM transition of the aerosol-molecular-ion composition of the atmosphere is 7–8 orders of magnitude lower than the probability of ED transitions, and MM radiation in the atmosphere will be reduced as much less. In addition, in this case the Biot-Savart law plays a key role in formation of the complex refractive index of the medium. This law favors minimization of the low- and high-frequency fluctuations of the signal during the self-organization of the "collective of fields + molecular gas" system ("CF + MG") into an optically active ensemble of diamagnetic electron-ion nanoparticles.

A new representation of laser radiation is based on the physics of laser consisting of two elements: molecular gas and biharmonic pumping radiation (BR). The key characteristics of these elements are described in the frameworks of the quantum-electromagnetodynamic (QEMD) approach to the interaction of e/m radiation with matter [13, 14]. Generation of MM radiation is formed at a stage of $\approx 10^{-12}$, which is less than the duration of the elastic collision of molecules. Generation of the MM radiation is self-excited in the ensemble of electron-ion nanoparticles at the moment of accumulation of the threshold



Вероятность магнитного мультипольного КВ перехода аэрозольно-молекулярно-ионного состава атмосферы на 7–8 порядков меньше вероятности ЭД переходов, и во столько же раз меньше будет ослабляться в атмосфере ММ излучение. Кроме того, ключевую роль в формировании комплексного показателя преломления среды играет закон Био-Савара. Этот закон способствует минимизации низко- и высокочастотных флуктуаций излучения при открытой самоорганизации системы "коллектив полей + молекулярный газ" ("КП+МГ") в оптически активный ансамбль диамагнитных наночастиц электрон-ион.

Цель работы – создать физическую основу генерации ММ излучения с когерентностью высокого порядка, винтовым фронтом, большим орбитальным магнитным/механическим моментом на частоте приготовленного ММ электронного перехода при заданной скорости накопления пороговой диамагнитной энергии.

2. АНОМАЛЬНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

2.1. Аномальный результат спектров H_2O в поле излучения лазера на рубине

В 1969 году научная группа лазерной спектроскопии из института ИОА СО РАН разработала, изгото-
вила и запустила в рабочий режим скоростной спектрометр на основе рубинового лазера с тепло-
вой и электрооптической перестройкой длины волн излучения. Многоходовая газовая кювета с оптической системой Уайта позволяла получать длину хода лазерного луча до $l \approx 300$ м при расстоя-
нии между зеркалами ~ 5 м.

Лазер генерировал БИ: две частоты шириной ≤ 300 МГц, разнесенные на интервал ≈ 300 МГц при десятикратном соотношении интенсивностей $I_1/I_2 \approx 1/10$. Шаг перестройки частоты излучения лазера ограничен снизу межмодовым интервалом, а сверху – однородной шириной контура спектральной линии среды.

В 1970 году на лазерном спектрометре изме-
рялись параметры известной линии 694,38 нм H_2O [15] при насыщенном водяном паре H_2O в N_2 . Использовалась генерация лазера на рубине при частоте следования ≈ 5 МГц двойных пичков импульса с шириной спектра ≤ 300 МГц излуче-
ния линейной (π) поляризации. Линия поглоще-
ния 694,38 нм соответствует вырожденному КВ
переходу $4_{-3} \rightarrow 5_{+4}$ полосы $000 \rightarrow 003$ основного элек-
тронного состояния молекулы H_2O . Поглощение излучения накачки в H_2O регистрировалось при

diamagnetic energy on the highly excited state of the prepared MM electronic transition.

The purpose of the paper is to create a physical basis for the generation of MM radiation with coherence of high order, a screw front, a large orbital magnetic/mechanical moment at the frequency of the prepared MM electronic transition at a given rate of accumulation of the threshold diamagnetic energy.

2. ANOMALOUS EXPERIMENTAL RESULTS IN LASER SPECTROSCOPY

2.1. Anomalous result of H_2O spectra in the ruby laser radiation field

In 1969, a group of laser spectroscopy at the IAO SB RAS developed, produced and put into operation a high-speed spectrometer based on a ruby laser with a thermal and electro-optical tuning of the radiation wavelength. The multi-path gas chamber with the White optical system made it possible to obtain the laser beam path length up to $l \approx 300$ at the distance between the mirrors ~ 5.0 m.

The laser generated BR: two frequencies of a width ≤ 300 MHz spaced apart by an interval ≈ 300 MHz at a tenfold intensity ratio $I_1/I_2 \approx 1/10$. The step of tuning the laser radiation frequency is limited from below by the intermode interval, and from above by the homogeneous width of the medium spectral line contour.

In 1970, the parameters of the known line of H_2O at 694.38 nm [15] were measured with a laser spectrometer at saturated water vapor H_2O in N_2 . Generation of the ruby laser was used at the repetition rate ≈ 5 MHz of double pulse peaks with the width ≤ 300 MHz of the spectrum of radiation with the linear (π) polarization. The absorption line of 694.38 nm corresponds to the degenerated SW transition $4_{-3} \rightarrow 5_{+4}$ of the band $000 \rightarrow 003$ of the principal electronic state of the H_2O molecule.

The absorption of pumping radiation in H_2O was recorded at a sensitivity of $K_{\lambda,\min} \approx 10^{-5}$ cm⁻¹ in the frameworks of the Bouguer's law for a more intense line of pumping BR with p-polarization with an error of 8–10% [16]. The ratio of the intensity of the beam leaving the chamber to its intensity at the input to the chamber was measured $K = J_v/J_{0v}$, Fig. 1.

In addition to the known absorption line of the H_2O molecule at 694.38 nm, nine other weak lines were recorded. An anomaly was detected: the width of the known absorption line is approximately twice less than the width of the collisional contour. The absorption coefficient K_l in the center of the contour was approximately twice greater than the data [15]. Some of the nine lines were recorded in 2006 by means of the optical-acoustic spectrometer (OAC) [17].

чувствительности $K_{\lambda,\min} \approx 10^{-5}$ см⁻¹ в рамках закона Бугера для более интенсивной линии БИ накачки π поляризации с погрешностью 8–10% [16]. Изменилось отношение интенсивности пучка, вышедшего из кюветы, к его интенсивности на входе в кювету $K = J_y/J_{0y}$ (рис.1).

Кроме известной линии 694,38 nm поглощения молекулы H₂O было зарегистрировано еще девять слабых линий. Обнаружена аномалия: ширина известной линии поглощения в ~2 раза меньше ширины столкновительного контура. Коэффициент поглощения K_1 в центре контура был в ~2 раза больше по сравнению с данными [15]. Некоторые из девяти линий зарегистрированы в 2006 году на оптико-акустическом спектрометре (OAC) [17].

В 1973 году на полихроматическом внутриволновом лазерном спектрометре (ВРЛС) в "провале" излучения рубинового лазера от линии поглощения 694,38 nm H₂O [15] зарегистрирован мощный монохроматический сигнал переизлучения вблизи центра линии поглощения (рис. 2). Результат опубликован в обзорной работе [18].

Функциональная связь между аномальным поглощением/переизлучением света молекулами H₂O в контуре линии 694,38 nm и структурой БИ накачки π поляризации найдена с помощью двух контрольных экспериментов.

2.2. Результаты контрольных экспериментальных измерений

В первом контрольном эксперименте на ОАС исследовалась зависимость контура линии 694,38 nm поглощения H₂O в N₂ от интенсивности I_t квазимонохроматического (0,03 см⁻¹) лазерного излучения на рубине при π и круговой (σ) поляризации [18].

Поглощение излучения σ поляризации (б) в центре линии 694,38 nm не изменялось при интенсивности 5–35 МВт/см², тогда как интенсивность излучения π поляризации (а) в центре линии уменьшалась, рис. 3.

Величина A(I_t, λ) соответствует сигналу ОАС в условиях квазистационарного ≈30–40 нс нелинейного поглощения. Обнаружено сужение контура

$$A(\lambda, I_t) \sim \left[\int_0^T \chi(\lambda, I_t) I_t dt \right] / \left[\int_0^T I_t dt \right]$$

линии поглощения при увеличении интенсивности в диапазоне I_t ≈ 20–35 МВт/см². Здесь T и $\chi(\lambda)$ – время измерения (0,5–1 час) контура и истинный контур линии поглощения.

Такое изменение A(I_t, λ) не может быть обусловлено спецификой оптико-акустического метода

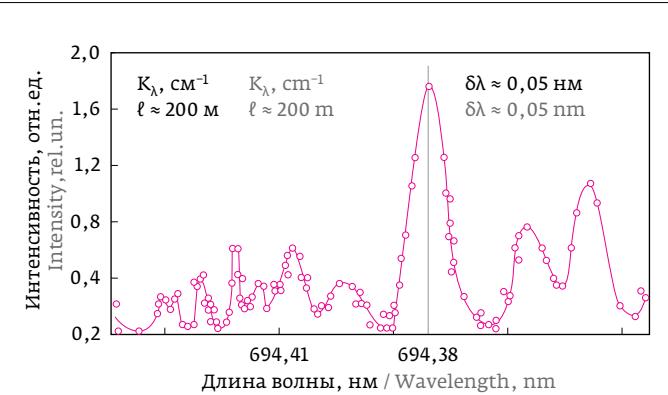


Рис.1. Спектр поглощения насыщенного водяного пара, зарегистрированного при условиях: P_{H₂O}=16,35 Torr, P_{N₂}=740 Torr, I₁/I₂≈1/10, δv≈0,3 Гц, v_s≈4,32·10⁵ Гц, T 300K

Fig. 1. Absorption spectrum of the saturated water vapor recorded under conditions: P_{H₂O}=16.35 Torr, P_{N₂}=740 Torr, I₁/I₂≈1/10, δv≈0,3 GHz, v_s≈4,32·10⁵ Hz, T 300K

In 1973, a powerful monochromatic reradiation signal near the absorption-line center was detected by means of a polychromatic intracavity laser spectrometer (ICLS) in the "laydown" of the ruby laser radiation from the H₂O absorption line at 694.38 nm [15], Fig. 2. The result was published in a review paper [18].

The functional relation between the anomalous absorption/reradiation of light by H₂O molecules in the line contour of 694.38 nm and the structure of pumping BR with π -polarization was revealed by means of two control experiments.

2.2 Results of control experimental measurements

The dependence of the H₂O absorption line contour of 694.38 nm in N₂ on the intensity I_t of quasi-monochromatic (0.03 cm⁻¹) ruby laser radiation at π and

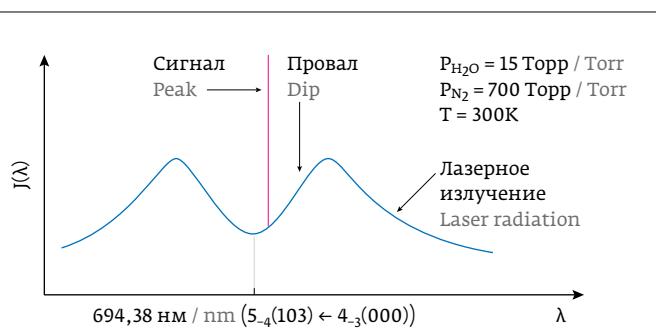


Рис.2. Сигнал переизлучения поля полихроматической накачки молекулами газа

Fig. 2. Reradiation signal of the field of polychromaticheskoy nakanochki molekulami gaza

измерения поглощения при больших интенсивностях возбуждающего излучения [19]. Предполагается наличие эффектов, связанных с изменением внутри- и межмолекулярного движения в сильном световом поле [20].

Интенсивность насыщения поглощения I_s , установленная из зависимости $A(I_t, \lambda)$ в центре линии поглощения по методике [19] для общего давления смеси $P_{H_2O+N_2} \approx 270$ Торр, имеет значение $(3,2 \pm 0,5)$ Дж/см². Это на порядок выше значения, вычисленного по дипольному моменту на переходе $4_{-3} \rightarrow 5_4$ полосы $000 \rightarrow 003$ молекулы H_2O .

К эффектам, объясняющим сужение столкновительного контура линии 694,38 нм молекул в сильном поле $I \approx 35$ МВт/см² при $P_{H_2O+N_2} \approx 300$ Торр, можно отнести следующие:

1. Сужение контура линии молекулярного поглощения в сильном поле σ поляризации за счет перестройки вращательных уровней H_2O [20].

Ширина линии составных КВ переходов молекулы H_2O обладает высокой чувствительностью к изменению ее поляризуемости во внешнем поле [18].

2. Усиление эффекта Дике [21].

Эффект Дике (сужение столкновительного контура линии) усиливается при "неравновесных" (экстремальных) условиях из-за роста корреляции между шириной, сдвигом уровней и вероятностью молекулярного перехода [22]. Рост корреляции возникает за счет вклада упругих столкновений в изменение проекций угловых моментов J_i, J_j уровней перехода при участии штарковского расщепления-смещения уровней перехода.

Оценки показывают: время для вклада упругих столкновений в сужении контура линии должно быть меньше времени свободного пробега молекул $\approx 10^{-10}$ с в условиях реальной атмосферы. Открывается возможность управления движением валентного электрона во времени и в пространстве на каждом шаге $T_{+q}/4 \leq 10^{-15}$ с за счет эффекта нелокальности отклика валентного электрона молекул на внешнее \mathcal{E}/m поле [23].

Второй контрольный эксперимент заключался в обнаружении влияния резонансного штарков-

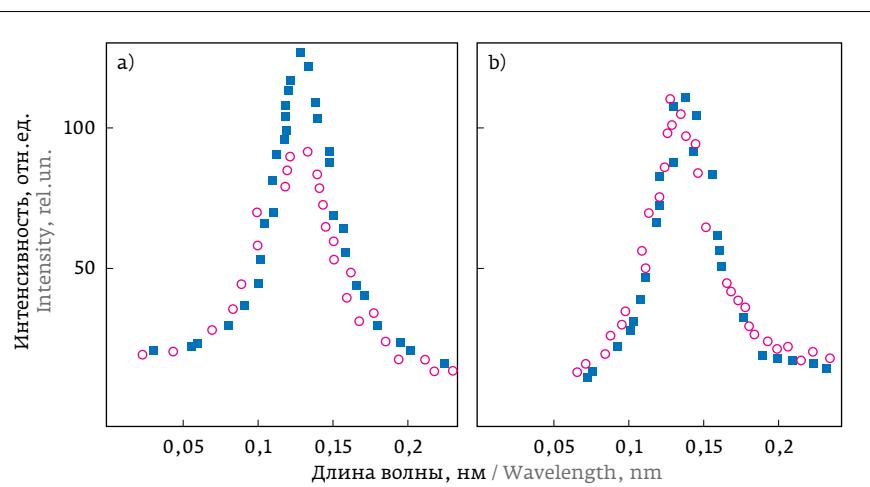


Рис.3. Зависимость поглощения в линии 694,38 нм молекул H_2O при линейной (а) и круговой (б) поляризации излучения лазера: ■ – $I \approx 5$ МВт/см², ○ – $I \approx 35$ МВт/см²

Fig. 3. Dependence of H_2O molecular absorption in the line 694,38 nm at linear (a) and circular (b) polarization of the ruby laser radiation: ■ – $I \approx 5$ MBm/cm², ○ – $I \approx 35$ MBm/cm²

circular (σ) polarization was studied in the first control experiment at OAS [18].

The absorption of radiation of s-polarization (b) in the line center 694,38 nm was not changed at the intensity of 5–35 MW/cm², while the intensity of radiation of p-polarization (a) in the line center decreased, Fig. 3.

The value $A(I_t, \lambda)$ is the OAS signal under conditions of quasi-stationary 30–40 nm non-linear absorption. Narrowing of the absorption line contour

$$A(\lambda, I_t) \sim \left[\int_0^T \chi(\lambda, I_t) I_t dt \right] / \left[\int_0^T I_t dt \right]$$

At the increase of the intensity in the range $I_t \approx 20-35$ MW/cm² was revealed. Here T and $\chi(\lambda)$ are the measurement time (0.5–1 hour) of the contour and the true contour of the absorption line.

Such a measurement $A(I_t, \lambda)$ cannot be caused by the specific manner of the optical-acoustic method of measuring absorption at big intensities of the exciting radiation [19]. One can assume the presence of the effects related with the change of intra- and intermolecular interaction in a strong light field [20].

The absorption saturation intensity I_s derived from the dependence $A(I_t, \lambda)$ in the absorption line center using the technique [19] for the total pressure of the mixture $P_{H_2O+N_2} \approx 270$ Torr takes the value $(3,2 \pm 0,5)$ Дж/см². It is almost one order of magnitude greater than the value calculated from the dipole moment at the transition under study $4_{-3} \rightarrow 5_4$ of the band $000 \rightarrow 003$ of the H_2O molecule.



ского расщепления-смещения вращательных уровней спектра поглощения H_2O радиочастотным (РЧ) полем на изменение контура линии КВ перехода при его резонансе оптическому излучению [24].

Молекула H_2O обладает постоянным дипольным моментом $\sim 2\text{D}$ и сложной структурой вращательных уровней, разделенных на интервалы $\Delta\omega_B \approx 1 \text{ см}^{-1}$. Штарковское расщепление КВ уровней составляет $\Delta\omega_{st} \approx (d_0 E_0 / \hbar)^2 / \Delta\omega_B$, где d_0 – дипольный момент на виртуальном переходе с рабочего на ближайший возмущенный уровень. При $d_0 \approx 10^{-4} \text{ D}$, $E_0 \approx 300 \text{ В/см}$ и $\Delta\omega_B \approx 1 \text{ см}^{-1}$ расщепление уровней составляет величину $\Delta\omega_{st} \leq 1 \text{ МГц}$.

Действие РЧ поля сводится к выравниванию населенности магнитных M -подуровней и корреляционной связи ("спектрального обмена") между оптическими переходами $J_m M_m \leftrightarrow J_n M_n$ за счет электрического дипольного момента, индуцированного упругим столкновением H_2O и N_2 .

Участие упругого столкновения молекул H_2O и N_2 изменяет контур КВ перехода линии поглощения $K(\omega)$ в оптическом поле. Простейшее сложение частот оптического ω и электрического Ω полей в трехуровневой схеме с участием, например, уровней $J_m 0, J_m 1, J_n 0$ (рис.4) реализуется как оптически-радиочастотный резонанс [25, 26].

Используя формулы (3.14)–(3.16) работы [26] и присутствие РЧ поля, получаем меру изменения контура $K(\omega)$ линии поглощения КВ перехода $\eta \approx (d_0 E_0 / \hbar)^2 \sim 1$ при $\Delta\omega_{st} \leq \gamma$. То есть, изменение частоты Ω в пределах ударной полуширины оптического перехода $\gamma \leq 10^9 \text{ с}^{-1}$ (давление газа

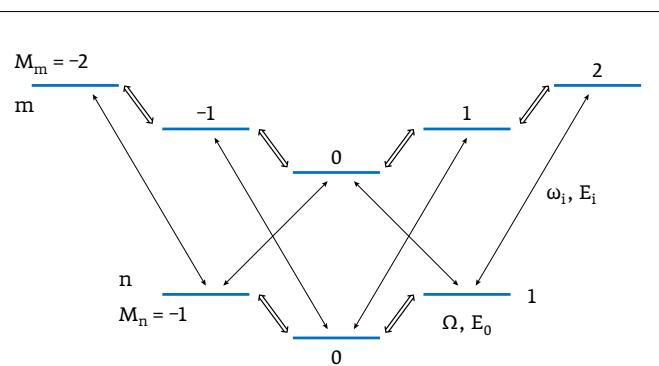


Рис.4. Уровни рабочего перехода H_2O , иллюстрирующие оптически-радиочастотный резонанс для угловых моментов уровней $J_m=2$ и $J_n=1$, Ω и E_0 – частота и напряженность РЧ поля; ω_i и E_i – частота и напряженность компонент оптического излучения

Fig. 4. Diagram of the levels of the working transition of H_2O illustrating the optical-radio-frequency resonance for the angular moments $J_m=2$ and $J_n=1$, Ω and E_0 are the frequency and strength of the RF field, respectively, ω_i and E_i are the frequency and strength of the components of the multi-frequency optical radiation

One consider the following effect among that explaining narrowing the molecule line contour 694,38 nm in the strong field $I_t \approx 35 \text{ MW/cm}^2$ at $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{N}_2} \approx 300 \text{ Torr}$.

1. Narrowing the molecular absorption line contour in the strong field due to transformation of the rotational levels of H_2O [20].

The width of the line of composite vibrational-rotational (VR) transitions of the molecule H_2O has a high sensitivity to a change in its polarizability in an external field [18].

2. Intensification of the Dicke effect (narrowing the collisional line contour) can intensify under "non-equilibrium" conditions of the medium because of the phase effect [22].

The phase effect appears at increasing correlation between the width, shift of levels and the probability of the molecular transition. The correlation increases because of the contribution of elastic collisions into the change of projections of the angular moments J_i , J_j of the transition levels at participation of the Stark splitting-displacement of the transition levels.

The estimates show that the time required for the contribution of elastic collisions into narrowing of the line contour should be less than the molecular free path time $\approx 10^{-10} \text{ s}$ under conditions of the real atmosphere.

The second experiment consisted in detecting the influence of the resonant Stark splitting-displacement

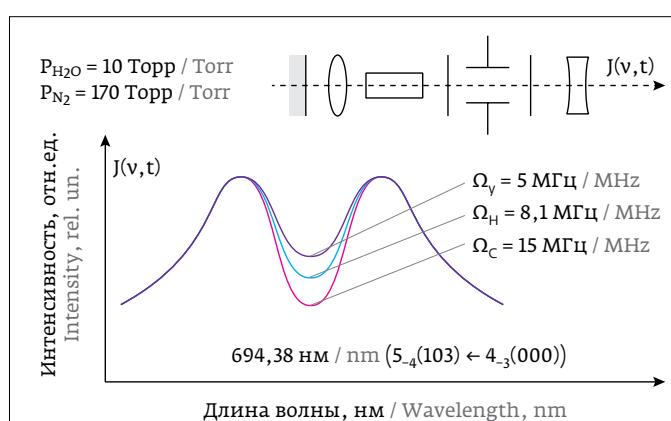


Рис.5. Изменения глубины $I(0)$ и ширины g_f контура "провала" от линии поглощения 694,38 nm в зависимости от частоты Ω

Fig. 5. Variations of the depth $I(0)$ and width g_f of the "laydown" contour of the absorption line 694,38 nm as function of the frequency Ω

~50–200 Torr) может и уширять, и сужать контур $K(\omega)$ линии поглощения по сравнению со случаем, когда РЧ поле $E_0=0$.

Эксперимент выполнялся на ВРЛС (длина резонатора $\ell=9,6$, межмодовый интервал 15 МГц) с динамической штарковской ячейкой в полуконфокальном резонаторе рубинового лазера (интервал между поперечными модами – единицы МГц). Амплитуда электрического поля на обкладках конденсатора ячейки в ВРЛС варьировалась в пределах 50–300 в/см. Частота Ω изменялась в диапазоне 1–20 МГц, характерном для частоты следования пичков свободной генерации лазера [16] и межмодового интервала полуконфокального резонатора лазера [24]. Результат эксперимента и схема ВРЛС показаны на рис.5.

В поле 300 в/см максимальное увеличение γ_f и уменьшение $I(0)$ достигается на частоте $\Omega_y=5$ МГц, а максимальные уменьшения γ_f и увеличения $I(0)$ достигаются на частоте $\Omega_c=15$ МГц. Смена знака деформации контура "провала" происходит на частоте $\Omega_h=8,1$ МГц. Результат измерения $I(0)$ и γ_f составляет 10–15% при разбросе значений измеряемых величин 4%. Зависимость "нейтральной" частоты от амплитуды поля квадратичная, что доказывает возможность управления сужением контура линии поглощения/переизлучения в аномальной области путем изменения структуры э/м поля накачки.

2.3. Запуск в молекулах H_2O механизма самоорганизации наночастиц электрон-ион

Анализ экспериментальных результатов и результата НИР в 2000–2002 годы привел к идее двумерного резонанса по энергии. Двумерный резонанс самоорганизуется между разностью $2\omega_{-q}=(\omega_{1q}-\omega_{2q})$, суммой $2\omega_{+q}=(\omega_{1q}+\omega_{2q})$ частот БИ накачки и низкочастотным $k' \rightarrow k$ (стартовым) ЭД, высокочастотным магнитным мультипольным (рабочим) $k \leftrightarrow k'$ КВ переходами. КВ переходы объединены состоянием k в V-схему (рис. 6).

Двумерный резонанс колебания энергий на частотах $2\omega_{-q}$ и $2\omega_{+q}$ запускает механизм двумерной (во времени-пространстве) ОС между энергиами квадратичных эффектов Штарка $\delta W_{St \parallel q=0}$ и Зеемана $\delta W_{Z \parallel q=0}$ при экстремальных условиях на систему "КП+МГ". Здесь $q=0, 1, 2, 3, \dots, q^*=2\omega_{+q=0}/2\omega_{-q=0}=10^3-10^6$ – целочисленный номер шага $T_{+q}/4$ воздействия коллектива полей $E_{\perp \parallel q}^\Sigma$ и $H_{\perp \parallel q}^\Sigma$ на каждую молекулу.

Коллектив полей [13, 14] состоит из векторной суммы электрических $D_{\perp \parallel q}^C + E_{\perp \parallel q}^B + D_{\perp \parallel q}^R + E_{\perp \parallel q}^\Sigma$ и вектор-

of the rotational levels of the H_2O absorption spectrum by the radio frequency (RF) field on the change in the line contour of the VR transition at its resonance to the optical radiation [24].

The H_2O molecule has the constant dipole moment ~2D and the complicated structure of the rotational levels divided into the intervals $\Delta\omega_B \approx 1 \text{ cm}^{-1}$. The Stark splitting of VR levels is $\Delta\omega_{st} \approx (d_0 E_0 / \hbar)^2 / \Delta\omega_B$, where d_0 is the dipole moment at a virtual transition from the working to the nearest excited level. At $d_0 \approx 10^{-4} \text{ D}$, $E_0 \approx 300 \text{ V/cm}$ and $\Delta\omega_B \approx 1 \text{ cm}^{-1}$ the split value is $\Delta\omega_{st} \leq 1 \text{ MHz}$.

The effect of the RF field is reduced to equalizing the populations of the magnetic M- sublevels and to correlation ("spectral exchange") between the optical transitions $J_m M_m \leftrightarrow J_n M_n$ due to the electric dipole moment induced by the elastic collision of H_2O and N_2 .

Participation of an elastic collision of molecules H_2O and N_2 changes the absorption line contour of the VR transition $K(\omega)$ in the optical field. The simplest addition of the frequencies of the optical ω and alternating electric Ω fields in a three-level diagram including, for example, the levels $J_m 0$, $J_m 1$, and $J_n 0$ (Fig.4) is realized as an optical-radio frequency resonance [25, 26].

Considering formulas (3.14)–(3.16) from [26] and the presence of RF field, we obtain the measure of the change of the line contour $K(\omega)$ of VR transition $\eta \approx (d_0 E_0 / \hbar \gamma)^2 \sim 1$ at $\Delta\omega_{st} \leq \gamma$. That means, the change of the frequency Ω within the limits of the impact half-width of the optical transition $\gamma \leq 10^9 \text{ s}^{-1}$ (the gas pressure ~50–200 Torr) can both broaden and narrow the line contour $K(\omega)$ in comparison with the case when the RF field $E_0=0$.

The experiment was carried out with ICLS (the resonator length was $\ell=9,6$, the intermode interval was 15 MHz) with a dynamic Stark cell in a semi-confocal resonator of a ruby laser (the interval between

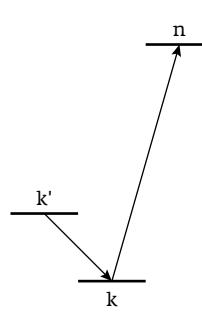


Рис. 6. V-схема колебательно-вращательных переходов
Fig. 6. V-diagram of the vibrational-rotational transitions



ной суммы магнитных $\mathbf{B}_{\perp\perp q}^C + \mathbf{H}_{\perp\perp q}^B + \mathbf{B}_{\perp\perp q}^R + \mathbf{H}_{\perp\perp q}^\Sigma$ компонент поля упругого столкновения (C) молекул с уширяющими молекулами, БИ накачки и поляризации (B) и релеевского рассеяния (R). Молекулярный газ - это рабочие молекулы H_2O (m_D) и уширяющие молекулы N_2 (m_b).

Молекулы H_2O в объеме когерентности БИ

$$\Delta V_{q=0} \rightarrow \Delta V_{q^*} \approx \Delta z_{\perp\perp q^*} \pi r_{nf\perp q^*}^2, \quad (1)$$

находящиеся в состоянии k' , участвуют в открытой самоорганизации системы "КП+МГ" в оптически активный ансамбль диамагнитных наночастиц электрон-ион на ММ электронном переходе, подготовленном в области рабочего $k \leftarrow n$ КВ перехода. Здесь $\Delta z_{\perp\perp q^*}$ и $\pi r_{nf\perp q^*}^2$ - длина временной когерентности и радиус пучка БИ накачки.

Механизм двумерной ОС реализуется между энергиями квадратичных эффектов Штарка $\delta W_{St\perp\perp q=0}$ и Зеемана $\delta W_{Z\perp\perp q=0}$ при экстремальных условиях на систему "КП+МГ" [13, 14].

$$2\omega_{-q}; 2\omega_{+q}; I_{1q}/I_{2q} \neq 1; m_b \gg N_{ph} \gg m_D; T^\circ\text{K} \quad (2)$$

Диамагнитная энергия в молекулах растет до пороговой величины $\delta W_{Z\perp\perp q^*}$ на каждом шаге $T_{+q}/4$ за счет колебания штарковской на частоте $2\omega_{-q}$ и зеемановской на частоте $2\omega_{+q}$ энергий при заданной асимметрии интенсивностей $I_{1q=0}/I_{2q=0} \neq 1$; N_{ph} - концентрация фотонов в объеме (1).

Упругое столкновение N_2 и H_2O индуцирует в H_2O электрический (3)

$$\mathbf{d}_{e\perp\perp q} = \alpha_{\perp\perp q} \mathbf{D}_{\perp\perp q}^C + 1/3 A_{\perp\perp q} \nabla \mathbf{D}_{\perp\perp q}^C + G_{\perp\perp q} \mathbf{B}_{\perp\perp q}^C \dots \quad (3)$$

и магнитный (4)

$$\mathbf{d}_{m\perp\perp q} = -\chi_{d\perp\perp q} \mathbf{B}_{\perp\perp q}^C - \tilde{G}_{\perp\perp q} \mathbf{D}_{\perp\perp q}^C \dots \quad (4)$$

the transverse modes was several units of MHz). The amplitude of electric field at the cell capacitor plates in ICLS varied within the limits 50–300 V/cm. The frequency Ω changed in the range 1–20 MHz characteristic of the repetition rate of the free energy peaks of the laser [16] and the intermode interval of the semi-confocal resonator of the laser [24]. The result of the experiment and the diagrams of the ICLS are shown in Fig. 5.

In the field of 300 V/cm, the maximum increase of γ_f and the decrease of $I(0)$ are reached at the frequency of $\Omega_y = 5$ MHz, and the maximum decrease of γ_f and increase of $I(0)$ are reached at the frequency of $\Omega_c = 15$ MHz. the change of the sign of deformation of the "laydown" contour occurs at the frequency of $\Omega_H = 8,1$ MHz. the results of measuring $I(0)$ and γ_f is 10–15% at the errors in the values of the measured values 4%. The dependence of the "neutral" frequency on the field amplitude is quadratic, that proves the possibility of the control of narrowing the contour of the absorption/reradiation line in the anomalous range by means of the structure of the external e/m field.

2.3. Launch of the self-organization mechanism of nanoparticles in molecules H_2O

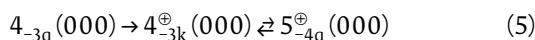
The analysis of experimental results and the result of research in 2000–2002 led to an idea of two-dimensional resonance in energy. The two-dimensional resonance is self-organized between the difference $2\omega_{-q} = (\omega_{1q} - \omega_{2q})$, the sum $2\omega_{+q} = (\omega_{1q} + \omega_{2q})$ of the BR pumping frequencies and the low-frequency $k' \rightarrow k$ (starting) ED, high-frequency magnetic multipole (work) $k \leftarrow n$ VR transitions. The VR transitions are combined by a lower state k into a V diagram, Fig. 6.

The two-dimensional resonance launches the mechanism of two-dimensional (in space and time)



дипольные моменты [27] с поляризацией $\alpha_{\perp q}$, диамагнитной восприимчивостью $-\chi_{d\perp q}$, квадрупольной поляризацией $1/3 A_{\perp \gamma q} \nabla D_{\perp \gamma q}$ и тензорами $G_{\perp q}$, $\tilde{G}_{\perp q}$. Тензоры $G_{\perp q}$, $\tilde{G}_{\perp q}$ функционально связаны с тензором гирации g_q молекулы H_2O .

В области излучения лазера на рубине используем V-схему в молекуле H_2O , которая состоит из двух КВ переходов



с общим низшим состоянием $4_{-3q}(000)$.

Состояние $4_{-3q}(000)$ молекулы H_2O – результат смещения на $2\Delta_{JK} \approx 345,6$ МГц за счет центробежного растяжения [28] и на $2\Delta_{JKq}$ за счет упругого столкновения H_2O с N_2 . Состояние $5_{-4q}^{\oplus}(000)$ – результат смещения за счет столкновения. Здесь $(000) \leftrightarrow (103)$ – колебательный переход молекулы H_2O и $J=4,5$ – квантовые числа углового момента H_2O .

Продолжение статьи будет посвящено физическим основам генерации магнитомультипольного излучения. Ранее эта работа была поддержана Фондом Сколково № КТИТ-11 от 18.09.2012 году и ТРИНЦ Томской области в 2014 году.

Авторы благодарны С. Н. Багаеву за обсуждение работы на Ученом совете ИЛФ СО РАН и С. М. Кобцеву за обсуждение работы в НИИГУ, В. Г. Багрову и А. А. Рухадзе за консультации и полезные дискуссии, В. Н. Черепанову и Р. Р. Валиеву за аналитику системы "коллектив полей+молекулярный газ".

ЛИТЕРАТУРА

1. Svelto O. Principles of Lasers. – С-Пб.: Лань, 2008.
2. Ораевский А. Н. – Квант. электр., 2001, т.31, № 12, с.1038.
3. Hanna D. C. Institute of Physics, Bristol, 1996, p.195–208.
4. Limpert J., Schmidt O. et al. – Optics Express, 2006, №14(7), p.2715.
5. Faist J., Capasso F. et al. – Science, 1994, v.264, p.553.
6. Faist J. et al. – Appl. Phys. Lett., 2001, v.78, p.141.
7. Scamarcio G., Capasso F. et al. – Science., 1997, v. 276, p.773.
8. Loudon R. The Quantum Theory of Light. Clarendon Press, Oxford, 1973.
9. Абрамочкин Е.Г., Волостников В. Г. Современная оптика гауссовых пучков. – М.: ФМЛ, 2010.
10. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. т.5. –Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
11. Djerroud K., Samain E. et al. – Optics Letters, 2010, v.35, Issue 9, p.1479.
12. Касаткин Н. Ф. – Технологии и средства связи, 2006, № 4.
13. Лопасов В. П. – Прикладная физика, 2012, № 4, с.24.
14. Лопасов В. П. – Опт. Атмосфера и океан, 2012, т.29, № 8, с.715.
15. Long R. K. – Columbus, Ohio State Univ. Engineering Publication Bull,

feedback between the energies of the quadratic Stark $\delta W_{St\perp q=0}$ and $\delta \check{W}_{Z\perp q=0}$ Zeeman effects at the extreme conditions for the "CF+MG" system. Here $q=0, 1, 2, 3, \dots; q^*=2\omega_{+q=0}/2\omega_{-q=0}=10^3-10^6$ is the integer number of the step $T_{+q}/4$ of the effect of the collective fields $E_{\perp q}^{\Sigma}$ and $H_{\perp q}^{\Sigma}$ on each molecule.

The collective of fields [13, 14] consists of the vector sum of the electric $D_{\perp q}^C + E_{\perp q}^B + D_{\perp q}^R + E_{\perp q}^{\Sigma}$ and the vector sum of magnetic $B_{\perp q}^C + H_{\perp q}^B + B_{\perp q}^R + H_{\perp q}^{\Sigma}$ components of the elastic collision field (C) of molecules with the broadening molecules, pumping BR with p-polarization (B) and the Rayleigh scattering (R). The molecular gas is the working molecules H_2O (m_D) and the broadening molecules N_2 (m_b).

In this case the molecules H_2O in the coherence volume of BR

$$\Delta V_{q=0} \rightarrow \Delta V_{q^*} \approx \Delta z_{\perp q^*} \pi r_{nf\perp q^*}^2, \quad (1)$$

existing in the state k' participate in the open self-organization of the "CF+MG" system into an optically active ensemble of diamagnetic electron-ion nanoparticles at the MM electron transition prepared in the range of the magnetic multipole $k \leq n$ VR transition. Here $\Delta z_{\perp q^*}$ and $\pi r_{nf\perp q^*}^2$ are the time coherence length and the pumping BR radius, respectively.

The two-dimensional feedback mechanism is realized between the energies of the quadratic Stark $\delta W_{St\perp q=0}$ and $\delta \check{W}_{Z\perp q=0}$ Zeeman effects at the critical conditions for the "CF+MG" system [13, 14].

$$2\omega_{-q}; 2\omega_{+q}; I_{1q}/I_{2q} \neq 1; m_b \gg N_{ph} \gg m_D; T^{\circ}K \quad (2)$$

The initial Stark $\delta W_{St\perp q=0}$ and Zeeman $\delta \check{W}_{Z\perp q=0}$ energies at the step $T_{+q}/4$ provide the increase of fluctuations of the diamagnetic energy up to the threshold value $\delta \check{W}_{Z\perp q^*}$ at the given asymmetry of intensities $I_{1q=0}/I_{2q=0} \neq 1$; N_{ph} – in the concentration of photons in the volume (1).

Elastic collision of N_2 and H_2O induces in H_2O the electric (3)

$$\mathbf{d}_{e\perp q} = \alpha_{\perp q} \mathbf{D}_{\perp q}^C + 1/3 A_{\perp \gamma q} \nabla \mathbf{D}_{\perp \gamma q}^C + G_{\perp q} \mathbf{B}_{\perp q}^C \dots \quad (3)$$

and magnetic (4)

$$\mathbf{d}_{m\perp q} = -\chi_{d\perp q} \mathbf{B}_{\perp q}^C - \tilde{G}_{\perp q} \mathbf{D}_{\perp q}^C \dots \quad (4)$$

dipole moments [27] with polarizability $\alpha_{\perp q}$, diamagnetic susceptibility $-\chi_{d\perp q}$, quadrupole polarizability $1/3 A_{\perp \gamma q} \nabla \mathbf{D}_{\perp \gamma q}$ and tensors $G_{\perp q}$, $\tilde{G}_{\perp q}$. The



- 1966, №199, р. 24.
16. **Зуев В. Е., Лопасов В. П., Макогон М. М.** – ДАН СССР, 1971, т. 199, № 5, с. 1041.
17. **Тихомиров А. Б., Пташник И. В., Тихомиров Б. А.** – Опт. и спектр., 2006, т. 101, с. 80.
18. **Лопасов В. П.** – Оптика атм. и океана, 1997, т. 10, № 9, с. 996.
19. **Макогон М. М., Пономарев Ю. Н.** В кн.: Лазерная спектроскопия атмосферных газов. – Томск: ИОА СО РАН, 1978.
20. **Апанасевич П. А.** Основы теории взаимодействия света с веществом. – Минск: Наука и техника, 1977.
21. **Dike R. N.** – Phys. Rev., 1953, № 2, p. 472–473.
22. **Бурштейн И., Стрекалов М. Л., Темкин С. И.** – ЖЭТФ, 1974, т. 66, № 3, с. 894–906.
23. **Ильинский Ю. А., Келдыш Л. В.** Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. – М.: МГУ, 1989.
24. **Кочанов В. П., Лопасов В. П. и Лукьяненко С. Ф.** – Известия Академии наук СССР, 1985, т. 49, № 3, с. 516–520.
25. **Стейнфельд Дж., Хаустон П.** В кн.: Лазерная и когерентная спектроскопия /Под ред. Стейнфельда Дж. – М.: Мир, 1982.
26. **Шимода К. В.** В кн.: Лазерная спектроскопия атомов и молекул / Под ред. Вальтера Г. – М.: Мир, 1979.
27. **Бекингем Э.** Основы теории межмолекулярных сил. Применение к малым молекулам. В кн. "Межмолекулярные взаимодействия: от двухатомных молекул до биополимерных" под редакцией Б. Пюльмена. – М.: Мир, 1981.
28. **Быков А. Д., Макушкин Ю. С., Улеников О. Н.** Колебательно-вращательная спектроскопия водяного пара. – Новосибирск: Наука, 1989.

tensors $G_{\perp\perp q}$, $\tilde{G}_{\perp\perp q}$ are functionally related with the gyration tensor g_q of the molecule H_2O .

In the range of the ruby laser radiation, we use the V-diagram in the molecule H_2O consisting of two VR transitions

$$4_{-3q}(000) \rightarrow 4_{-3k}^{\oplus}(000) \rightleftharpoons 5_{-4q}^{\oplus}(000) \quad (5)$$

with the common lowest state $4_{-3q}(000)$.

The state $4_{-3q}(000)$ of the molecule H_2O is the result of displacement by $2\Delta_{JK} \approx 345.6$ due to the centrifugal extension [28] and by $2\Delta_{JKq}$ due to the elastic collision of H_2O with N_2 . The state $5_{-4q}^{\oplus}(000)$ is the result of displacement due to the collision. Here $(000) \rightleftharpoons (103)$ is the vibrational transition of the molecule H_2O and $J=4, 5$ are the quantum numbers of the angular moment H_2O .

The authors thanks S. N. Bagaev for discussion of the result of the work at the Academic Council of the Institute of Laser Physics SB RAS and S. M. Koltsev for a discussion of the results of the work, V. G. Bagrov and A. A. Rukhadze for consultations and useful discussions, V. N. Cherepanov and R. R. Valiev for the analytics of the "field collective + molecular gas" system.

*The work was supported by the Skolkovo Foundation No. KTIT-11 on 18.09.2012 and TRINC of the Tomsk Region in 2014.
to be continued*

ОБЪЯВЛЕН КОНКУРС НА СОИСКАНИЕ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ РАН ИМЕНИ АКАДЕМИКА А. М. ПРОХОРОВА

Российская академия наук объявляет конкурс на соискание золотой медали имени А. М. Прохорова, присуждаемой отечественным ученым за выдающиеся работы в области физики. Премия учреждена в 2008 году в память о лауреате Нобелевской премии академике Александре Михайловиче Прохорове.

Все мы знаем о величайшем открытии Александра Михайловича Прохорова, которое во многом изменило не только научный пейзаж, но и культурное мировоззрение современного поколения жителей планеты. Ученники и коллеги А.М.Прохорова знакомы с его научными работами. Но значительно меньший круг людей знает о его научно-организационной работе. С 1973 года до 1991 года академик Прохоров возглавлял в Академии наук работу Отделения физических наук, активно участвовал во внедрении лазера в развивающиеся при-

кладные технологии. В этот период был организован Институт прикладной физики, ответственный за исследования в области физики плазмы, мощных СВЧ-устройств, гидрофизики и акустики, оптики и физики лазеров (1977). В 1982 году на базе Отделения А Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР (Лаборатория колебаний, Лаборатория физики плазмы и Лаборатория физики твердого тела) был создан Институт общей физики (ИОФ), и А. М. Прохоров стал его первым директором. При организации института А. М. Прохоров заложил новую структуру лабораторий, предвидя направления будущего развития науки и технологий. Ныне в институте, носящем его имя, ведутся работы, связанные с лазерной физикой и использованием лазеров в медицине и в технике связи, использованием мощных лазеров для получения и исследования вещества в экстремальных



состояниях. В Институте общей физики ведут исследования в области волоконной оптики, акустики и гидрофизики.

Срок представления работ: до 11 апреля 2018 года. Условия участия в конкурсе опубликованы по адресу: <http://www.ras.ru/news/>.

www.ras.ru