

УДК 535

ИЗ ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРОВ¹*К 95-летию ГОИ им. С.И. Вавилова***И.М. Белоусова^{a, b}**^a ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия, belousova.i.m@gmail.com^b Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия

В работе кратко описана история становления нового направления науки – квантовой электроники, связанная с открытием мазеров и лазеров учеными США (Ч. Таунс) и СССР (Н.Г. Басов и А.М. Прохоров). Представлен первый в мире лазер на рубине, разработанный Т. Мейманом. Приведены некоторые исторические факты, характеризующие исследование и разработку лазеров и, в особенности, роль сотрудников ГОИ им. С.И. Вавилова, автора статьи, а также Университета ИТМО и ЛОМО в разработке твердотельных и газовых лазеров (гелий-неоновых, фотодиссоционных, CO₂-лазеров) и лазерных оптических систем. Показано участие сотрудников ГОИ им. С.И. Вавилова, ЛОМО и Университета ИТМО в крупных программах по разработке лазеров для лазерного термоядерного синтеза, лазерного оружия и программы «Фобос». Освещены новые аспекты разработки и применения лазеров – в первую очередь, в проекте лазерной орбитальной космической станции будущего, а также для преобразования солнечной энергии в лазерное излучение. Приведено описание запатентованной ГОИ им. С.И. Вавилова идеи преобразования солнечной энергии с помощью фуллерен-кислородного лазера. Описаны разработанный фуллерен-кислород-йодный лазер и модели конструкций лазера для технологических применений и преобразования солнечной энергии в лазерное излучение. Даны параметры гипотетической лазерно-оптической системы космической станции будущего.

Ключевые слова: мазер, лазер на рубине, газовый гелий-неоновый лазер, лазерное оружие, фотодиссоционный лазер, CO₂-лазер, фуллерен-кислород-йодный лазер, солнечная накачка.

FROM THE HISTORY OF LASER CREATION¹*Dedicated to the 95th anniversary of Vavilov State Optical Institute***I.M. Belousova^{a, b}**^a «Vavilov State Optical Institute», Saint Petersburg, Russia, belousova.i.m@gmail.com^b Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia

The paper briefly describes the history of formation of a new science direction - quantum electronics, associated with the discovery of masers and lasers by scientists from the USA (Ch. Townes) and the USSR (N.G. Basov and A. M. Prokhorov). The world's first ruby laser designed by T. Maiman is described. Some historical events devoted to creation and research of lasers are given in which the author of the paper as well as research workers from Vavilov State Optical Institute, ITMO University and LOMO have taken direct part in the development of solid-state and gas lasers (helium-neon, photo-dissociation, CO₂-lasers) and laser optical systems. Contribution of researchers from Vavilov State Optical Institute, LOMO and ITMO University to large-scale programs on development of lasers for laser nuclear fusion, laser weapons and "Phobos" program is shown. The paper deals in brief with new issues of development and application of lasers, mainly, within the project of laser orbital space station of the future, for the conversion of solar energy into laser radiation. Description of idea of solar energy transformation by fullerene-oxygen laser is presented. The patent for it has been taken out by Vavilov State Optical Institute. Developed fullerene-oxygen-iodine laser and laser structure models for industrial applications and solar energy conversion into laser radiation are described. Parameters for hypothetical laser-optical system of the future space station are given.

Keywords: maser, ruby laser, gas helium-neon laser, laser weapons, photo dissociation laser, CO₂ - laser, fullerene-oxygen-iodine laser, solar pumping

Введение

«Открытие физических принципов квантовой электроники в 1954 г. – одно из самых выдающихся достижений науки ушедшего века, придавшее значительный импульс развитию современной цивилизации. Венцом этого достижения, безусловно, является создание в 1960 году лазера – источника высококогерентного оптического излучения», – высказался О.Н. Крохин, академик ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Москва [1].

16 мая 1960 г. в США американским ученым и инженером Теодором Мейманом (1927–2007 г.г.) в исследовательской лаборатории фирмы Хьюз (Hughes Research Laboratories) был запущен первый лазер (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). С этого момента началось бурное развитие лазерной науки и техники во всем мире.

¹ Статья написана по материалам лекции, прочитанной автором на Международной школе-семинаре «Лазерная фотоника», Университет ИТМО, 12–13 декабря 2013 г.

The paper is based on a lecture given by the author at the International School-Seminar «Laser Photonics», ITMO University, December, 12–13, 2013.

Предпосылки создания лазеров

Основой лазеров является созданная в 1916 г. А. Эйнштейном теория поглощения и испускания света атомами. Эйнштейн рассмотрел взаимодействие фотонов с системой (атомами и молекулами), обладающей двумя энергетическими уровнями E_1 и E_2 , причем энергия фотона совпадает с разностью энергий этих уровней (рис. 1). Согласно теории Эйнштейна, переход $E_1 \rightarrow E_2$ происходит с поглощением фотона $h\nu = E_2 - E_1$. Переход из возбужденного состояния E_2 в нижнее состояние может происходить самопроизвольно (спонтанное излучение). Помимо этого процесса, Эйнштейн предположил существование еще одного процесса, а именно, переход в нижнее состояние E_1 под действием фотонов спонтанного излучения. Этот процесс был им назван вынужденным излучением.

Свойства спонтанного и вынужденного излучения сильно отличаются. Спонтанное излучение имеет случайный характер: фаза, направление распространения, поляризация световых волн, излучаемых различными атомами, не согласованы друг с другом. Это означает, что излучение ансамбля атомов некогерентно.

При вынужденном излучении испускаемый фотон неотличим от фотона, который вызывает его появление. Частота, фаза, направление распространения испускаемого фотона совпадают с соответствующими характеристиками фотона, вызвавшего его излучение. Это означает, что вынужденное излучение когерентно, т.е. согласовано по свойствам с тем излучением, которое его вызывает. Кроме того, вместо одного фотона за счет вынужденного излучения появляется два фотона, а это означает, что возможно усиление света и, при осуществлении обратной связи, генерация когерентного излучения.

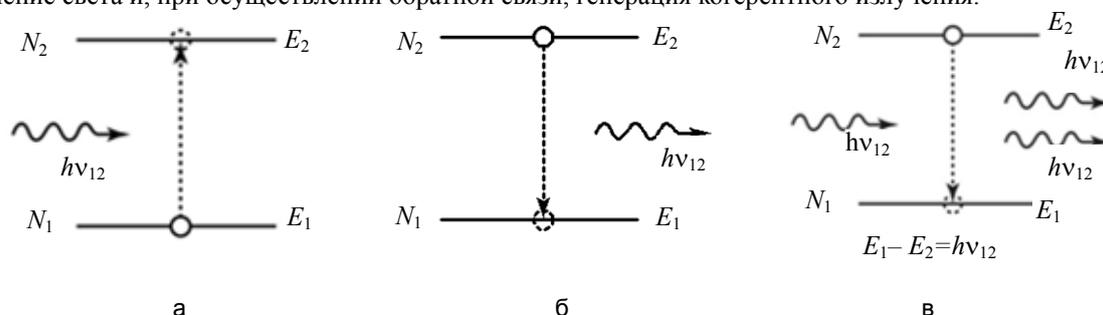


Рис. 1. Взаимодействие фотонов с системой, обладающей двумя энергетическими уровнями: поглощение (а); спонтанное излучение (б); вынужденное излучение (в)

Необходимым условием осуществления усиления и генерации света является создание инверсной населенности энергетических уровней атомов и молекул, т.е. условие, при котором концентрация атомов или молекул на верхнем возбужденном уровне (N_2) больше, чем на нижнем уровне (N_1), и выполняется соотношение

$$\frac{N_2}{N_1} > \frac{g_2}{g_1},$$

где g_2 и g_1 – статистические веса энергетических уровней. Оказалось, что в оптическом спектральном диапазоне такое условие выполнить было сложно, и ученые обратились к радиодиапазону.

Хотя уже в 1938 г. советским физиком В.А. Фабрикантом был предложен метод экспериментального доказательства существования вынужденного излучения, он был первым, кто обратил внимание на принципиальную возможность создания среды, усиливающей излучение (отрицательная абсорбция). В 1951 г. В.А. Фабрикантом совместно с М.М. Вудынским и Ф.А. Бутаевой была подана заявка на изобретение «Нового способа усиления электромагнитного излучения ультрафиолетового (УФ), видимого, инфракрасного (ИК) и радиодиапазона», которая не была принята. Авторское свидетельство было выдано только в 1959 г. А в 1964 г., уже после запуска лазеров, В.А. Фабрикант, М.М. Вудынский и Ф.А. Бутаева получили диплом об открытии №12 с приоритетом от 18 июня 1951 года на «Способ усиления электромагнитного излучения (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн), основанный на использовании явления индуцированного испускания». К сожалению, это изобретение не было вовремя оценено, так как оно сильно опережало развитие науки в данном направлении и не было в то время подтверждено экспериментом.

В 50-е годы прошлого столетия возникла новая область исследований – радиоспектроскопия. В начале 50-х годов в лаборатории колебаний им. Л.И. Мандельштама и А.Д. Папалекси Физического института имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), по инициативе А.М. Прохорова, начались спектроскопические исследования молекул в радиочастотном диапазоне. В эти работы после окончания Московского физико-технического института (МФТИ) включился молодой ученый Н.Г. Басов [1].

В США радиоспектроскопией активно занималась группа ученых Колумбийского университета под руководством Ч. Таунса. Предметом исследований в области радиоспектроскопии являлось изучение

строения молекул и их вращательных состояний (рис. 2, а), переходы между которыми лежат в области субмиллиметрового диапазона. В связи с тем, что расстояние между вращательными состояниями молекул мало, при комнатной температуре часть молекул переходит на верхнее возбужденное состояние, и наблюдать поглощение с нижнего энергетического состояния оказалось сложным. Кроме того, процесс наблюдения ухудшался доплеровским уширением линий.

Для преодоления этих трудностей в радиоспектроскопии стали применять метод молекулярных пучков. Появилась идея – отделить молекулы, находящиеся на верхнем возбужденном уровне, от молекул, находящихся на нижнем уровне. Тогда фракция молекул, находящихся на нижнем уровне, будет поглощать свет, а находящиеся на верхнем под действием радиоволны будет давать вынужденное излучение. Рассортировать молекулы по энергетическим состояниям удалось благодаря одному интересному свойству некоторых из них. Некоторые молекулы имеют дипольный момент, связанный с определенным распределением зарядов положительных ядер атомов, составляющих молекулу, и окружающих их электронов. Причем некоторые молекулы, например, аммиак NH_3 (рис. 2, б), имеют дипольный момент, величина которого различна для молекул, находящихся в разных энергетических состояниях определенного перехода в радиодиапазоне ($\lambda=1,26$ см). В неоднородном электрическом поле молекулы аммиака, находящиеся на верхнем и нижнем энергетических уровнях, не только ориентируются, но и дрейфуют в направлении градиента неоднородности поля. Исходя из этого, если создать молекулярный пучок (например, аммиака) и пропускать его через сильно неоднородное электрическое поле, то можно разделить пучок на два: в одном будут преимущественно молекулы в нижнем состоянии, а в другом – в верхнем. Неоднородное электрическое поле создавалось так называемым «квадропольным конденсатором». Такая «сортировка» молекул приводит к созданию инверсной населенности, т.е. получению активной среды. Важным обстоятельством при «сортировке» молекул является то, что, согласно теории Эйнштейна, вероятность спонтанного перехода возбужденной молекулы пропорциональна γ^3 , т.е. время жизни $\sim \lambda^3$. Например, для перехода с $\lambda=1,26$ см молекулы без потерь, находясь в возбужденном состоянии, могут пройти примерно 1 м пути. Если отсортированные в возбужденном состоянии молекулы ввести в резонатор, настроенный на определенную частоту соответствующего перехода, то при условии, что усиление вынужденного излучения молекул превосходит потери резонатора, можно получить генератор электромагнитных волн (рис. 2, в) [2].

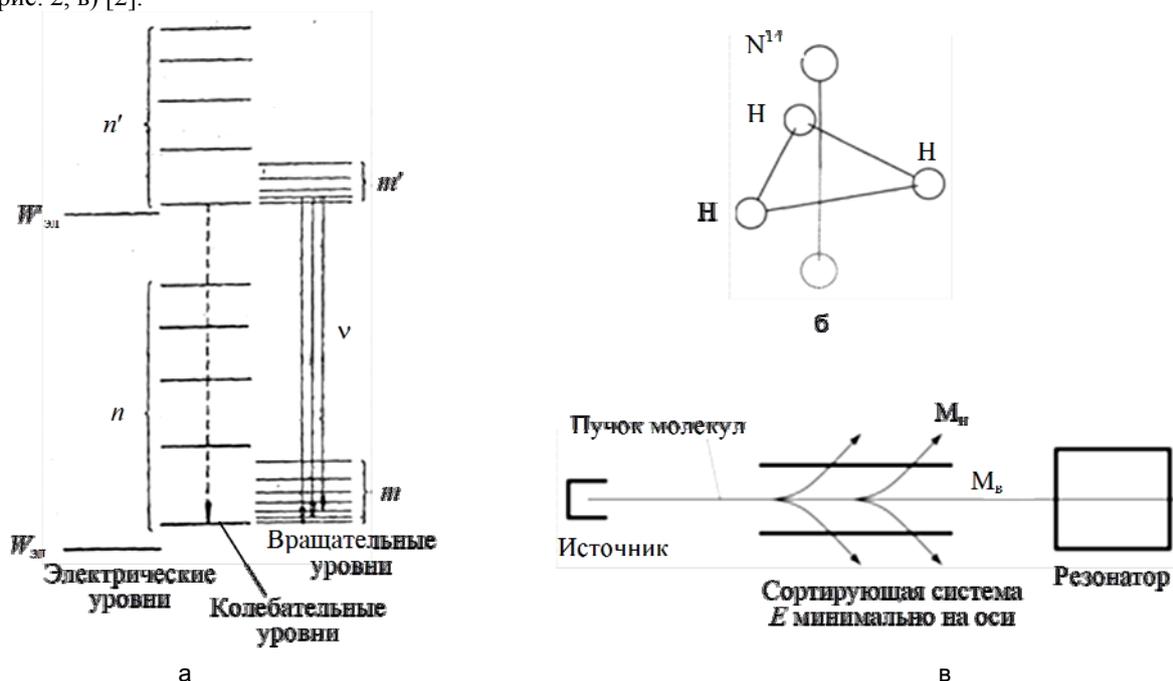


Рис. 2. Энергетические уровни молекул (а); молекула аммиака NH_3 (б); сортировка молекул по вращательным состояниям (в)

Первые публикации в печати, относящиеся к квантовым генераторам, появились в 1954 г. В январе 1954 г. Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым была направлена в редакцию Журнала экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ) статья «Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул» [3], опубликованная в октябре 1954 г. В статье Н.Г. Басов и А.М. Прохоров писали: «Используя молекулярный пучок, в котором отсутствуют молекулы в нижнем состоянии рассматриваемого перехода, можно сделать «молекулярный генератор»». В мае 1954 г. Ч. Таунс с сотрудниками направил в журнал «Physical Review» статью «Микроволновой молекулярный генератор и новая сверхтонкая структура микроволнового спектра аммиака» [1], которая была опублико-

вана уже в июле того же года. В статье сообщалось о том, что «создана и работает экспериментальная установка, которая может быть использована в качестве микроволнового спектрометра высокого разрешения, микроволнового усилителя или очень стабильного генератора».

Таким образом, фактически одновременно и независимо были высказаны идеи, описан и осуществлен в 1954 г. в СССР Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым и в США Ч. Таунсом с сотрудниками новый тип генератора радиоволн. Такой генератор электромагнитных волн был назван мазером. МАЗЕР – аббревиатура английского названия Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление СВЧ волн с помощью индуцированного излучения).

1954 год считается началом нового направления науки – квантовой электроники. В 1964 г. Ч. Таунс, Н.Г. Басов и А.М. Прохоров были удостоены Нобелевской премии по физике «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей, основанных на мазерно-лазерном принципе» (рис. 3).

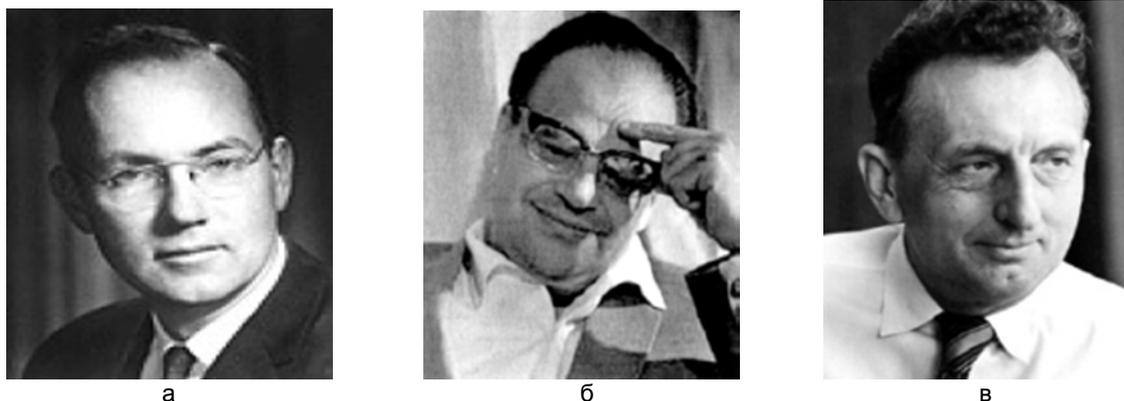


Рис. 3. Лауреаты Нобелевской премии по физике: Чарльз Таунс (а); Николай Басов (б); Александр Прохоров (в)

Создание первого лазера

После создания мазера на аммиаке были проведены исследования в направлении разработки мазеров на твердом теле. Концепция и конкретная конструкция твердотельного мазера были детально разработаны профессором Гарвардского университета Н. Бломбергеном. Затем Г. Феер и его коллеги в лаборатории «Bell Telephone» сделали первый твердотельный мазер с использованием идеи Н. Бломбергена на кристалле этилсульфата гадолиния. Вскоре профессор К. Кикучи из Мичиганского университета разработал твердотельный лазер на искусственном кристалле рубина. Стандартный твердотельный мазер представлял собой огромное и очень тяжелое устройство весом 2,3 т, выполненное со сложными криогенными устройствами и магнитами. Предполагалось, что мазер может детектировать и усиливать чрезвычайно малые микроволновые сигналы.

Т. Мейман в этот период начал работать в лаборатории Хьюза (Hughes Research Laboratories) с мазером К. Кикучи, провел его усовершенствование и в 1959 г., закончив работу, уменьшил вес с 2,3 т до 11,3 кг. Заказчик, войска связи США, установили его на входе приемного радара и были удовлетворены его работой [4].

В 1958 г. появилась статья Ч. Таунса и А. Шавлова «Оптические и инфракрасные мазеры» в журнале «Physical Review» [5]. В статье было высказано предложение создать инфракрасный лазер на парах калия, получившее большой резонанс в научном мире. Начался интенсивный поиск сред, на которых можно было бы создать лазер. Т. Мейман выбрал для исследования кристалл розового рубина, оптические свойства которого он хорошо знал [4]. Изучение квантового выхода флюоресценции, разработка идеи использования импульсной лампы с высокой яркостной температурой и применение эллиптического рефлектора были основой для создания Т. Мейманом лазера на кристалле рубина (рис. 4).

16 мая 1960 года Т. Мейман, вопреки мнению многих именитых ученых, запустил первый лазер именно на кристалле розового рубина. Впоследствии в книге «Лазерная Одиссея» Т. Мейман написал: «Замечу, в заключение, что хотя мазер был очень интересным предметом физических исследований в течение нескольких лет, он был всего лишь промежуточным этапом, который, возможно, даже отвлек внимание на пути создания лазера».

Надо отметить, что Т. Мейману не удалось опубликовать статью о создании лазера в престижных журналах «Physical Review Letters» или «Journal of Applied Physics». Известие о создании первого лазера нашло широкий отклик после организованной администрацией фирмы Хьюз пресс-конференции в отеле Дельмоника в Нью-Йорке 7 июля 1960 года. Краткий вариант статьи Т. Меймана, в котором впервые сообщается о получении когерентного света, был опубликован в журнале «Nature» 6 августа 1960 года под названием «Вынужденное оптическое излучение на рубине» [6].

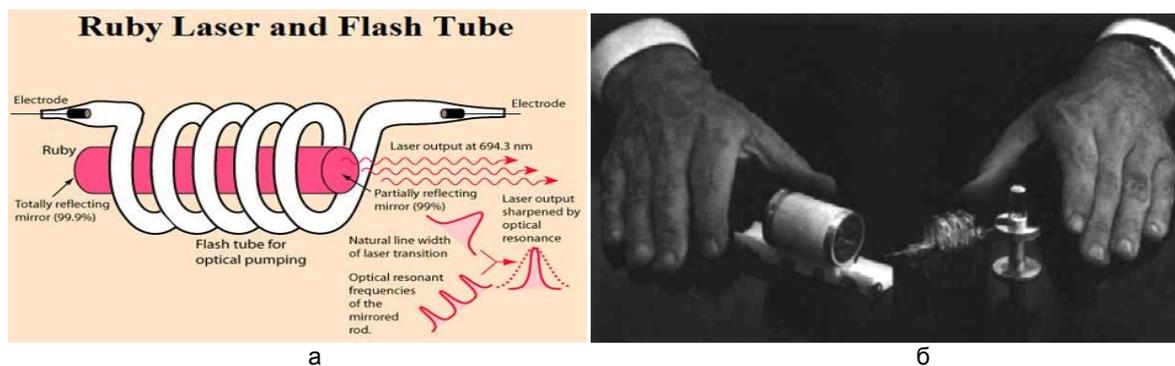


Рис. 4. Лазер на кристалле рубина: схема (а); фото (б)

Менее чем через год А. Джаван и его коллеги в США запустили лазер на смеси газов гелия и неона, возбуждаемой непрерывным электрическим разрядом. Этот лазер работал в непрерывном режиме [7].

Первые работы в СССР по созданию лазеров

Работы по созданию лазеров интенсивно велись в СССР, начиная с конца 1960 г. В ФИАН (г. Москва) и в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ им. С.И. Вавилова, г. Ленинград) по инициативе академика А.А. Лебедева и д.ф.-м.н. М.П. Ванюкова.

Первый в СССР лазер – рубиновый – был запущен 2 июня 1961 года в ГОИ им. С.И. Вавилова, в отделе академика А.А. Лебедева, лаборатории М.П. Ванюкова, Леонидом Дмитриевичем Хазовым (рис. 5, а) с участием И.М. Белоусовой [8]. В ФИАН СССР лазер был запущен 18 сентября 1961 года М.Д. Галаниным, А.М. Леонтович, З.А. Чижиковой [9].

Предпосылками создания лазера в ГОИ им. С.И. Вавилова послужили глубокие научные заделы в области спектроскопии и люминесценции кристаллов (Д.С. Рождественский, С.И. Вавилов, П.П. Феофилов, А.Н. Теренин), в области физической оптики и импульсных источников света (А.А. Лебедев, М.П. Ванюков, А.М. Бонч-Бруевич, С.И. Левиков), а также первоклассные научные школы оплотехники и конструирования (В.П. Линник, Е.Н. Царевский, И.А. Тельтевский) и активных сред лазеров (В.Т. Славянский, А.И. Стожаров, Г.О. Карапетян). Именно благодаря этому в ГОИ им. С.И. Вавилова были начаты интенсивные разработки твердотельных лазеров. С конца 1960 г. Л.Д. Хазовым было начато детальное изучение состояния разработки лазеров в США, а также подготовка элементной базы для запуска лазера на рубине в ГОИ им. С.И. Вавилова [10].

На рис. 5, б, приводятся страницы из рабочего дневника Л.Д. Хазова. На странице от 2 июня 1961 г. показаны наши опыты по получению генерации на кристаллах рубина: увеличение энергии лампы накачки от 550 Дж до 2200 Дж – от люминесценции до генерационного пика.

Дополнительно для доказательства генерационного режима 08.06.1961 г. и 12.06.1961 г. Л.Д. Хазовым были проведены опыты с более быстрой разверткой осциллографа и получено разрешение пикового режима, характерного для генерации.

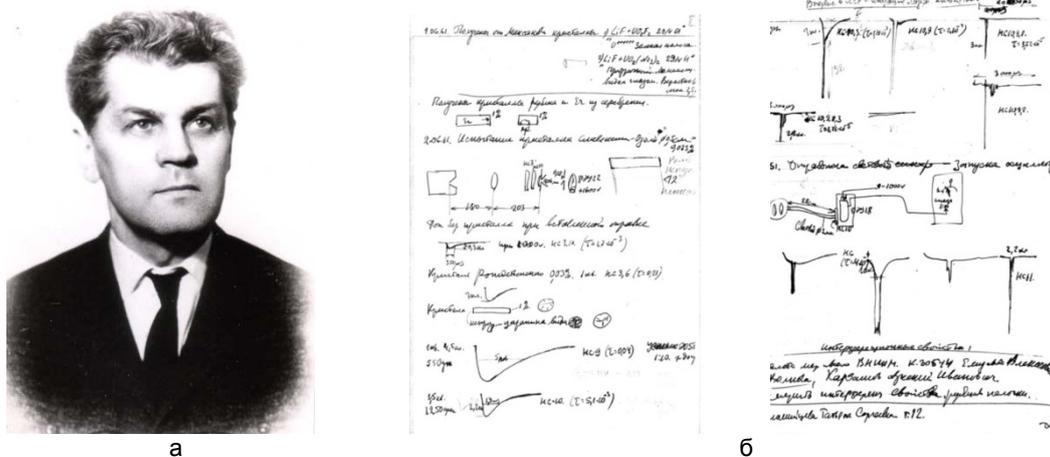


Рис. 5. Л.Д. Хазов (а); из рабочего дневника Л.Д. Хазова (б)

Необходимо отметить, что все элементы опыта были выполнены в ГОИ им. С.И. Вавилова: кристаллы созданы в лаборатории В.Т. Славянского, покрытия на торцах рубина нанесены в лаборатории

В.Н. Рождественского, лампы накачки изготовлены в лаборатории С.И. Левикова, кристаллы обработаны мастерами-оптиками экспериментального производства ГОИ.

В 1961 году, после выхода статьи А. Джавана о запуске первого газового лазера на смеси газов гелий–неон, в ГОИ по инициативе И.М. Белоусовой были начаты работы в области газовых лазеров [11]. В 1962 г. группой И.М. Белоусовой (куда входили И.М. Белоусова, О.Б. Данилов, И.А. Елькина) был запущен газовый гелий-неоновый лазер с плоским резонатором и резонатором плоскость–сфера [12]. Конструкция гелий-неонового лазера была разработана выдающимся конструктором И.А. Тельтевским. Лазер был изготовлен на опытном производстве ГОИ, где работали блестящие мастера-оптики, сумевшие в те годы изготовить зеркала резонатора с точностями обработки поверхности до 0,01 полосы (рис. 6).

Создание первых лазеров, твердотельного и газового, явилось началом интенсивных работ ряда отделов и групп ГОИ над новыми активными средами, улучшением параметров лазеров и их применением.

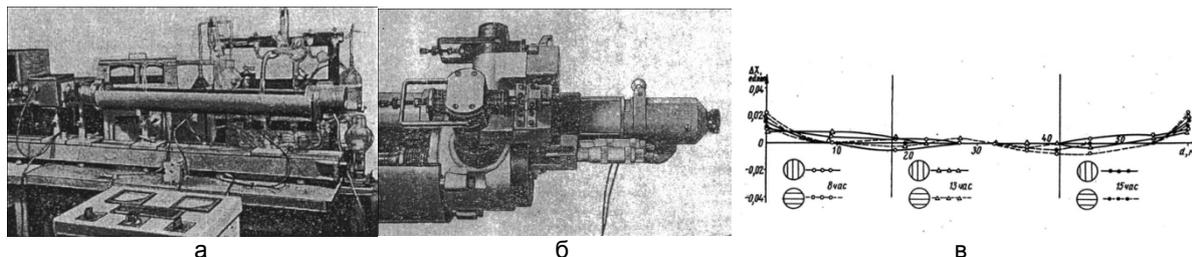


Рис. 6. Экспериментальная установка генератора с резонатором плоскость–сфера (а); головка резонатора с подвижным плоским зеркалом, точность юстировки ± 1 с (б); качество обработки поверхности плоского зеркала (в)

Поскольку автор статьи возглавляла исследования в области газовых лазеров, то в статье, в основном, уделено внимание именно работам ГОИ по разработке и применению газовых лазеров. Так, например, одним из первых применений газового гелий-неонового лазера явилась работа по передаче информации по лучу лазера (И.М. Белоусова, О.Б. Данилов, Ю.В. Попов, И.Н. Адрианова). 7 октября 1963 года была впервые осуществлена передача телевизионного изображения по лучу гелий-неонового лазера через атмосферу на 1300 м между ГОИ и Ленинградской военно-инженерной космической академией (ЛВИКА) им. А.Ф. Можайского (С.И. Бахтин, В.М. Очеленков, Б.С. Данилов), продемонстрировавшая информационную емкость светового диапазона длин волн и возможность транспортировки излучения через атмосферу. Это было зафиксировано в протоколе работы комиссии сотрудников ГОИ и ЛВИКА по установлению факта передачи телевизионной информации с помощью лазера. На рис. 7 приведен пример переданного изображения.



Рис. 7. Пример изображения, переданного по лучу гелий-неонового лазера

Дальнейшее развитие эти работы получили в опытно-конструкторской работе (ОКР) «Кратер» по созданию многоканальной линии связи (300 телефонных каналов) по лучу гелий-неонового лазера. ОКР велась Красногорским оптико-механическим заводом, ГОИ, ЛВИКА и Центральным научно-исследовательским институтом связи (ЦНИИС). Опытные станции передачи информации были установлены на ряде объектов, в том числе в Москве, Армении и на космодроме «Байконур». На рис. 8 приведена фотография приемо-передающей станции «Кратер» и титульного листа журнала «Советский Союз» с изображением луча лазера над Москвой (1965 г.) при передаче информации 300 телефонных каналов по лучу лазера между Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова (МГУ) и г. Красногорском (33 км).

Нельзя не отметить чрезвычайно важные эксперименты, проводимые в ФИАН СССР по первым применениям твердотельных лазеров. Так, в 1963 г. учеными ФИАН В.С. Зуевым и П.Г. Крюковым была впервые осуществлена локация Луны с помощью рубинового лазера с модулированной добротностью.

Подготовка кадров в области квантовой электроники являлась важной вехой в создании лазеров в СССР. В 1963 г. в ЛИТМО под руководством д.т.н., профессора К.И. Крылова была создана первая специа-

лизируемая кафедра для подготовки специалистов в области лазерной техники и лазерной физики – кафедра квантовой электроники. За более чем 50-летний период на кафедре было подготовлено более 1200 специалистов-лазерщиков, которые в настоящее время работают на многих предприятиях России и зарубежных стран. С момента возникновения на кафедре начали проводиться научные исследования по важнейшим фундаментальным и прикладным вопросам квантовой электроники. В конце 1960-х годов на кафедре под руководством К.И. Крылова были запущены мощные лазеры на углекислом газе, которые были совместно с медиками (профессор Б.И. Хромов) применены в пионерских работах по лазерной хирургии.

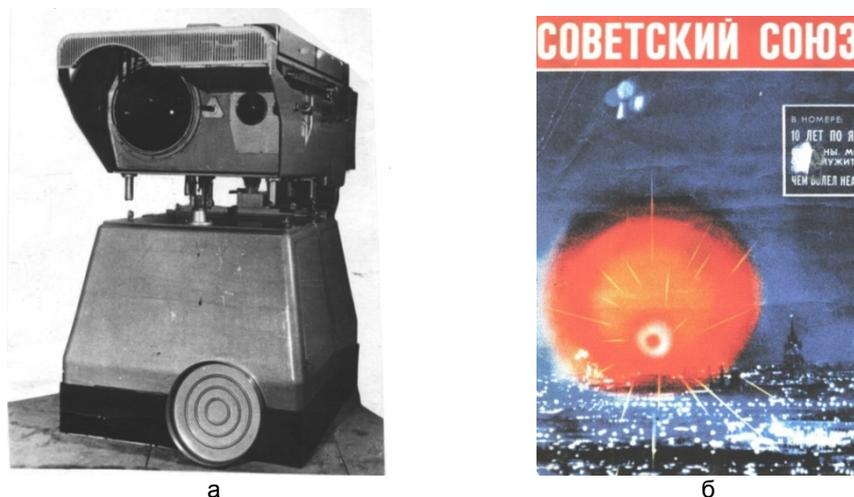


Рис. 8. Фотография приемо-передающей станции «Кратер» (а); титульный лист журнала «Советский Союз» с изображением луча лазера над Москвой (1965 г.) (б)

Разработка и создание лазеров находились под постоянным вниманием правительства СССР, прежде всего, Министра оборонной промышленности С.А. Зверева, знавшего досконально оптическую отрасль, науку и промышленность, который неоднократно бывал в ГОИ им. С.И. Вавилова.

В 1964 г. в Москве Министерством оборонной промышленности была организована первая выставка разработанных в СССР лазеров. На выставке демонстрировались газовые лазеры и лазерное телевидение, твердотельные и полупроводниковые лазеры, первые дальнометры на лазерах – разработки ГОИ, Научно-исследовательского института прикладной физики (НИИПФ), Ленинградского оптико-механического объединения (ЛОМО) и др. Выставку посетил Первый секретарь ЦК КПСС, Председатель Совета Министров СССР Н.С. Хрущев. После проведения выставки было издано первое постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР о развитии лазерной техники в СССР.

В работы в области исследований, создания и применения лазеров включились десятки организаций, в том числе Академия наук СССР, предприятия оптической отрасли, электронной и радиопромышленности, учебные учреждения. В СССР началась эпоха бурного развития лазеров различных типов и назначений.

Лазерная лаборатория, лазерный отдел ГОИ им. С.И. Вавилова (1971 г.), НИИ лазерной физики (1993 г.)

Сотрудничество с промышленностью и учебными учреждениями. В 1971 году на базе лазерной лаборатории был создан лазерный отдел ГОИ им. С.И. Вавилова. В 1993 г. на базе этого отдела был организован НИИ лазерной физики, который возглавил профессор Артур Афанасьевич Мак (рис. 9). В 2005 г. НИИ лазерной физики был переименован в ФГУП «Научно-производственная корпорация «ГОИ им. С.И. Вавилова», ныне ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова». ГОИ им. С.И. Вавилова – один из ведущих центров страны в области лазерной физики. Многие исследования, выполненные в ГОИ, явились основой для создания систем и приборов, находящихся на мировом уровне либо превосходящих его.

Важнейшими направлениями теоретических и экспериментальных исследований НИИ лазерной физики и лазерного отдела (ныне отделения) являлись и являются разработка и исследования лазеров и лазерно-оптических систем с уникальными параметрами. Подробно направления работ и достижения в области лазеров и их применений в ГОИ им. С.И. Вавилова освещены в статье [13], поэтому здесь отметим только некоторые из них.

Необходимо подчеркнуть, что в течение всех лет, начиная с 1962 г. ГОИ им. С.И. Вавилова был тесно связан с промышленностью и, прежде всего, с ЛОМО, которое уже в 1965 г. выпустило серийный твердотельный лазер (на неодимовом стекле) с энергией 1000 Дж (ГОС-1000), сразу же нашедший широкое применение в научных и военных организациях.



Рис. 9. А.А. Мак, научный руководитель Института лазерной физики, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Ленинской и Государственной премии СССР, премии Правительства РФ, доктор физико-математических наук, профессор

Одной из самых крупных программ в 70–80-ые годы прошлого столетия являлась программа лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). В ГОИ программы по ЛТС были начаты в 1963–1964 г.г. по инициативе М.П. Ванюкова. Далее эти работы возглавил А.А. Мак. Под его руководством была создана шестиканальная лазерная установка «Прогресс» (в филиале ГОИ в Сосновом Бору), на которой впервые в мире были проведены эксперименты со сферическими мишенями при импульсах излучения с управляемой формой и длительностью (В.А. Серебряков, А.Д. Стариков, А.В. Чарухчев и др.). В 1970–1990 г.г. при научном руководстве сотрудников ГОИ промышленностью было создано большое число лазерных систем, более двух десятков которых были приняты на вооружение Советской Армии (рис. 10).

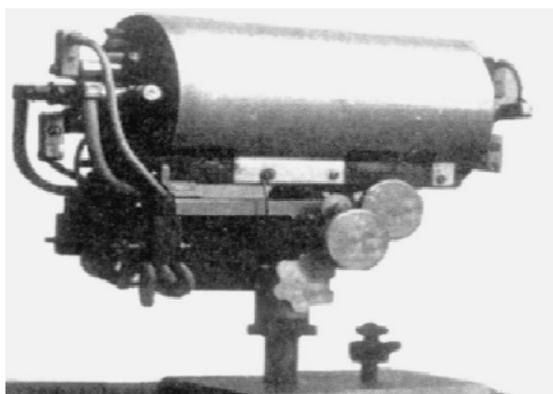


Рис. 10. Твердотельный лазер, созданный под руководством ГОИ им. С.И. Вавилова в Конструкторском бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана (КБТМ)

Целый ряд исследований и разработок был направлен на реализацию твердотельных и газовых лазеров с малой угловой расходимостью, близкой к дифракционной, на разработку резонаторов различного типа, на изучение причин неоднородностей в активных средах и их устранение, на осуществление точной адресации лазерного пучка, а также методов нелинейной коррекции aberrаций в лазерных средах и оптических элементах (А.А. Мак, Ю.А. Ананьев, В.Е. Шерстобитов, А.А. Лещев, Л.Н. Сомс, С.А. Димаков и др.). Новые возможности в области создания лазерных систем для ЛТС открыли работы по компрессии методами вынужденного рассеяния импульсного лазерного излучения и возможности получения пикосекундных лазерных импульсов, способных конвертировать на мишени излучение до 10^{19} Вт/см² и получить рентгеновское излучение с интенсивностью до 10^{15} Вт/см² (С.Б. Паперный, В.Е. Яшин и др.) (рис. 11).

Значительное место в работах лазерного отдела ГОИ уделялось созданию высокостабильных твердотельных лазеров, которые обеспечивали прогресс в области создания систем связи, локации и измерительных систем (В.И. Устюгов, А.А. Орлов и др.).

Широкомасштабные исследования проводились в лазерном отделе по газовым лазерам (фотодиссоционным, CO₂- и СО-лазерам) под руководством И.М. Белоусовой, О.Б. Данилова и В.Е. Шерстобитова.

Одновременно с экспериментальными исследованиями и разработками лазерных приборов и систем под руководством профессора Н.Н. Розанова (рис. 12) широким фронтом велись теоретические исследования и численное моделирование оптических процессов в лазерах и системах на их основе, в том

числе распространения лазерного излучения в средах (воде и атмосфере), что дало опорные предпосылки для оптимизации лазерных систем.

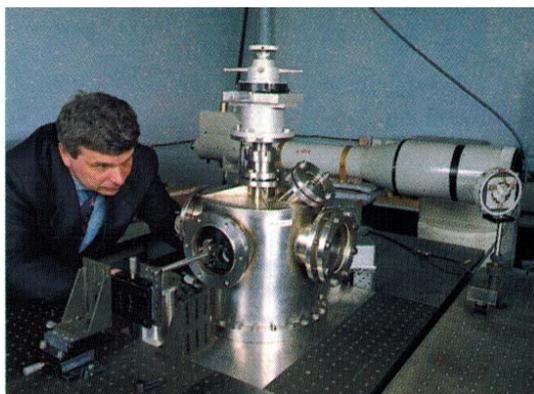


Рис. 11. Мишенная камера для изучения взаимодействия сверхсильных полей с веществом

Важнейшим фактором являлось развитие лазерного направления в учебных учреждениях страны, прежде всего в ЛИТМО, МИФИ, МФТИ, ЛПИ и ЛЭТИ. Так, в ЛИТМО в 1970–1980 г.г. велась научная работа по созданию твердотельных лазеров высокой мощности, исследованию нелинейно-оптических свойств материалов квантовой электроники, созданию новых твердотельно-жидкостных лазерных активных сред на красителях. Эти работы проводились в тесном сотрудничестве как с академическими, так и с отраслевыми научно-исследовательскими институтами и предприятиями (Институт химии силикатов АН СССР, Институт общей физики АН СССР, Институт космических исследований, ГОИ им. С.И. Вавилова, ЛОМО и др.). В 1984–1989 г.г. на кафедре квантовой электроники был разработан компактный лазерный излучатель с рекордными характеристиками для международного космического проекта по программе «Фобос». Данная программа положила начало широкому участию специалистов кафедры квантовой электроники в различных проектах по созданию разнообразных твердотельных лазерных излучателей с уникальными характеристиками. Так, для применения в офтальмологии был разработан твердотельный лазер с длиной волны излучения 200 нм, совместно с австрийской компанией LMI для стоматологии была разработана трехволновая лазерная система «Оникс», для технологических применений – лазер высокой яркости на неодимовом стекле с энергией генерации более 15 кДж, для дальномеров – несколько типов импульсных лазерных излучателей. В настоящее время кафедра носит название «Кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики», и одним из основных направлений исследований стали научные работы в области биомедицинских применений (стоматология, косметология, хирургия). В период 1988–2007 г.г. научно-учебную работу успешно и плодотворно осуществлял филиал кафедры в ГОИ им. С.И. Вавилова и Институте лазерной физики под руководством профессора А.А. Мака.



Рис. 12. Н.Н. Розанов, физик-теоретик, специалист в области нелинейной оптики и лазерной физики, чл.-корр. РАН, заведующий кафедрой «Оптика лазеров» Университета ИТМО, профессор

В 2011 г. в Университете ИТМО Институтом лазерной физики ГОИ им. С.И. Вавилова была организована кафедра «Оптика лазеров» (заведующий кафедрой – чл.-корр. РАН, профессор Н.Н. Розанов) (рис. 12), которая готовит специалистов в области лазерной физики и техники, а также нелинейной оптики и нанопотоники.

Об участии лазерного отдела ГОИ им. С.И. Вавилова в советском проекте по использованию лазеров в оборонных задачах

Значительное влияние на развитие лазерных исследований во всем мире и в СССР оказала программа стратегической оборонной инициативы (СОИ), провозглашенная Президентом США Рейганом.

Вопросы противоракетной обороны (ПРО) рассматривались в США и СССР как национальные стратегические задачи. Применение лазеров в решении этой задачи, учитывая возможность передачи энергии на объект со скоростью света, было чрезвычайно заманчивым. В связи с этим уже в 1963 г., отвечая на запрос заместителя Министра обороны президенту АН СССР М.В. Келдышу с просьбой оценить возможность военного применения лазеров, специалисты-лазерщики ФИАН Н.Г. Басов и О.Н. Крохин писали: «Вероятно, можно создать генераторы с энергией 10^6 – 10^7 Дж, используя в качестве источника энергии взрыв обычного ВВ» [14].

В 1964–1965 г.г. в СССР была поставлена задача создания лазерного оружия. Были начаты масштабные исследования и разработки в области создания мощных лазеров различного типа (фотодиссоционных с оптической, в том числе взрывной накачкой, газодинамических CO_2 -лазеров, химических лазеров и др.), систем формирования узконаправленного излучения лазеров, систем локации и наведения излучения лазеров на движущиеся цели. Исследовались и создавались новые активные среды, изучалось прохождение лазерного излучения через различные среды, велись работы по исследованию воздействия лазерного излучения на различные объекты, создавались стенды и полигоны. Подробно история разработки лазерного оружия в мире и в СССР изложена в замечательной книге П.В. Зарубина «Лазерное оружие – миф или реальность».

Работы по мощным лазерам возглавлялись академиками Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым. ГОИ им. С.И. Вавилова выполнял большой комплекс исследований, связанных с уменьшением угловой расходимости мощных лазеров (отдел А.А. Мака), с оптическими системами локации и наведения (лаборатория П.П. Захарова), с силовой оптикой мощных лазеров (отдел А.М. Бонч-Бруевича и филиал № 1 ГОИ под руководством академика Г.Т. Петровского).

В данной статье нет возможности осветить все работы ГОИ им. С.И. Вавилова по программам создания мощных лазерных систем, поэтому здесь мы упомянем два направления, в которых лаборатория, возглавляемая И.М. Белоусовой, принимала непосредственное участие.

Фотодиссоционные импульсные йодные лазеры с оптической накачкой (ФДЛ)

Физическая идея, лежащая в основе создания ФДЛ, была предложена и опубликована сотрудниками ФИАН С.Г. Раутианом и И.И. Собельманом в 1961 г. Они теоретически показали, что можно получить возбужденные атомы или молекулы путем фотодиссоциации более сложных молекул при их возбуждении интенсивным светом [15]. В 1964 г. американские ученые Д. Каспер и Дж. Пайментел [16] опубликовали работу о получении импульсной генерации на атомах йода при фотодиссоциации молекул перфторалкилиодидов ($\text{CF}_3\text{I} + h\nu_{\text{нак}} \rightarrow \text{CF}_3 + \text{I}^*(S^2P_{1/2}) \rightarrow \text{CF}_3 + \text{I}(S^2P_{3/2}) + h\nu_{\text{ген}}$). В фотодиссоционном лазере Д. Каспера и Дж. Пайментела для накачки применялась ксеноновая лампа. Энергия генерации атомов йода на $\lambda = 1,315$ мкм измерялась миллиджоулями. В 1966 г. была получена энергия излучения такого лазера 100 Дж.

По инициативе Н.Г. Басова и академика Ю.Б. Харитона (Всесоюзный научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ВНИИЭФ), г. Саров) в 1965 г. были начаты работы по созданию фотодиссоционных лазеров с накачкой светом ударной волны от взрыва взрывчатого вещества (ВВ). Вскоре начались исследования и эксперименты с взрывными источниками накачки, которые проводились во ВНИИЭФ коллективом под руководством С.Б. Кормера и Г.А. Кириллова совместно с сотрудниками ФИАН (группа В.С. Зуева). В 1965–1966 г.г. была продемонстрирована генерация фотодиссоционного лазера с накачкой светом фронта ударной волны. Существенный шаг в создании высокоэнергетического фотодиссоционного лазера был сделан, когда по предложению ФИАН была убрана кварцевая стенка, разделяющая источник света накачки и активную среду. Источник накачки – взрывчатка – находился непосредственно в активной среде (перфторалкилиодид $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$ с ксеноном). Такой подход, учитывая свойства фотодиссоционного лазера – движущуюся волну фотодиссоциации – позволил создавать конструкции лазера большого диаметра и длиной десятки метров [17, 18].

С 1966 г. ГОИ им. С.И. Вавилова активно включился в программу работ по созданию высокоэнергетических лазеров и оптических систем локации, а также систем транспортировки и наведения лазерного излучения. Работы по данному направлению возглавлял заместитель директора ГОИ по науке Е.Н. Царевский. В 1966 г. для выполнения оптических задач в ГОИ были созданы лаборатории, в том числе Лаборатория фотодиссоционных лазеров под руководством И.М. Белоусовой (с 1967 года). Лаборатория широким фронтом начала заниматься фотодиссоционными лазерами, включая изучение кинетики процессов в активной среде (группа В.Ю. Залесского), создание источников накачки ФДЛ (группа С.И. Андреева), исследование предельных энергетических и угловых характеристик ФДЛ (группа О.Б. Данилова), а также работы по магнитооптике ФДЛ (группа В.М. Киселева) и оптотехнике (группа В.А. Григорьева). Сотрудники лаборатории активно взаимодействовали с ФИАН и ВНИИЭФ, а в дальнейшем с ЦКБ «Луч» (НПО «Астрофизика»). Работы по испытанию высокоэнергетических ФДЛ велись не только в лаборатории, но и на полигоне ВНИИЭФ (И.М. Белоусова, В.А. Григорьев). При мощной поддержке Министра оборонной промышленности С.А. Зверева к созданию оптических систем крупно-

габаритных ФДЛ был подключен ряд оптических заводов (ЛОМО, Лыткаринский оптико-механический завод), где были созданы новые специальные цеха и участки по варке стекла и изготовлению оптических деталей, а также вакуумные установки для нанесения покрытий на крупногабаритные детали диаметром до 1,3 м. Разработанные и изготовленные ЛОМО (КБ Б.Я. Гутникова) оптические резонаторы диаметром до 1,3 м для ФДЛ до сих пор не имеют себе равных в мировой практике. ГОИ им. С.И. Вавилова осуществлял научное руководство этими разработками в промышленности.

Таким образом, совместные исследования и разработки ФИАН, ВНИИЭФ, ГОИ, ГИПХ, ВНИИОФИ и промышленности привели к стремительному развитию фотодиссоционных лазеров. В течение трех лет, с 1966 по 1969 годы, энергия излучения ФДЛ выросла со 100 Дж до 1 МДж [19].

На рис. 13, в, представлен график зависимости энергии генерации ФДЛ диаметром 1,3 м от длины лазера, а на рис. 13, б, – первый в мире (и не превзойденный до сих пор) мегаджоульный импульсный ФДЛ с накачкой светом ударной волны ВВ [20].

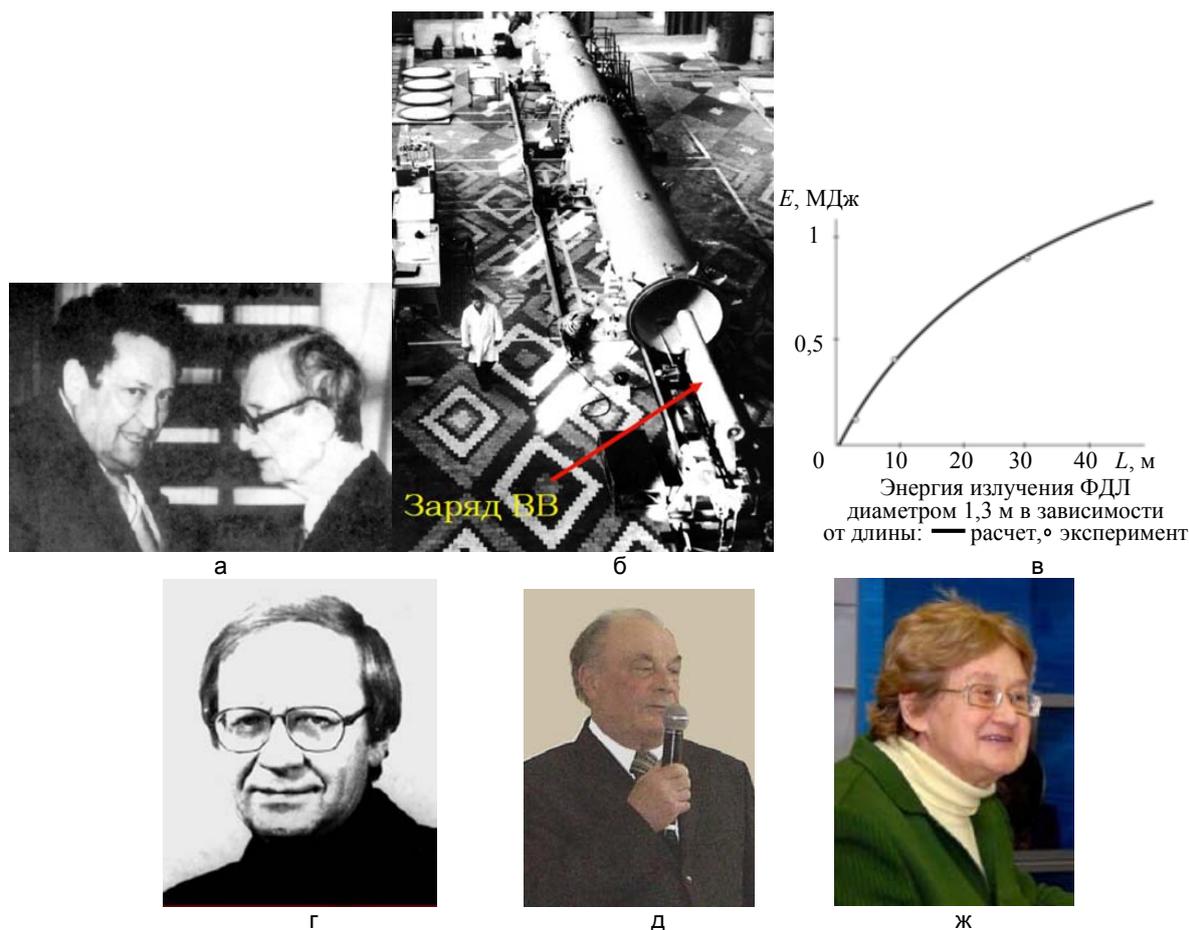


Рис. 13. С.Б. Корнер и академик РАН и Ю.Б. Харитон (ВНИИЭФ) (а); первый в мире мегаджоульный импульсный лазер (сборка в ВНИИЭФ, 1969 г.) (б); график зависимости энергии генерации ФДЛ, \varnothing 1,3 м, от длины лазера (в); В.С. Зуев (ФИАН) – теория ВФДЛ (г); Г.А. Кириллов – эксперименты с ВФДЛ (д); И.М. Белоусова – оптика ВФДЛ (ж)

С развитием взрывных ФДЛ возникла идеологическая проблема – полное или частичное уничтожение дорогостоящего лазера после одного импульса. Исходя из этого, по инициативе ФИАН и ГОИ им. С.И. Вавилова были начаты исследования и разработки неразрушаемого, многократного ФДЛ с накачкой светом излучения мощных электрических разрядов. В ГОИ, в Лаборатории фотодиссоционных лазеров С.И. Андреевым и О.Б. Даниловым проводились исследования ФДЛ с накачкой различными типами разрядов (поверхностный, ламповый и т.д.). Для работ с крупномасштабными лазерами под руководством ГОИ были созданы лаборатории и установки в филиале № 2 ГОИ (В.Н. Рыбин, Е.А. Зобов). Стендовые опыты с ФДЛ с накачкой светом от многоканальных взрывающихся проволочек (идея В.С. Зуева и Б. Боровича) проводились во ВНИИЭФ под руководством А.И. Павловского. Питание электрического разряда осуществлялось магнитно-кумулятивными генераторами. Работы на стендах ВНИИЭФ от ГОИ велись группой О.Б. Данилова. Была получена энергия излучения лазера 100 кДж.

Работы по усовершенствованию конструкции и характеристик ФДЛ с участием ГОИ (В.М. Киселев, А.П. Жевлаков и др.) привели к созданию установки «Искра-5» для лазерного термоядерного синтеза. Уникальная оптика для мишенной камеры была разработана и изготовлена ЛОМО.

Мощные частотно-импульсные CO₂ лазеры

Исследования по изучению взаимодействия импульсного излучения ФДЛ с веществом, а также успехи в области разработки CO₂-лазеров [21, 22] привели к концу 70-х годов прошлого столетия к развитию идей создания импульсно-периодических лазеров со средней мощностью мегаваттного уровня. Разработку такого электроионизационного (ЭИ) CO₂-лазера возглавило НПО «Астрофизика», созданное как головная организация страны по разработке лазерного оружия. Под руководством В.К. Орлова и Н.В. Чебуркина на полигоне «Радуга» (И.С. Косминов) был в короткие сроки создан частотно-импульсный ЭИ CO₂-лазер с энергией в импульсе 5–10 кДж и частотой следования импульсов 100–150 Гц (рис. 14) [23, 24]. В течение нескольких лет в НПО «Астрофизика» совместно с ГОИ им. С.И. Вавилова (лаборатория И.М. Белоусовой) были разработаны системы формирования и доставки мощного лазерного излучения по горизонтальной атмосферной трассе.

Впервые было продемонстрировано действие линейных адаптивных систем коррекции аберрации волнового фронта (ВФ) лазера и аберрации на атмосферной трассе до 4 км [25]. Для коррекции динамических неоднородностей в мощном лазере была разработана и использована схема улучшения угловой расходимости на основе метода обращения волнового фронта, была достигнута дифракционная расходимость ЭИ CO₂-лазера (лаб. В.Е. Шерстобитова)

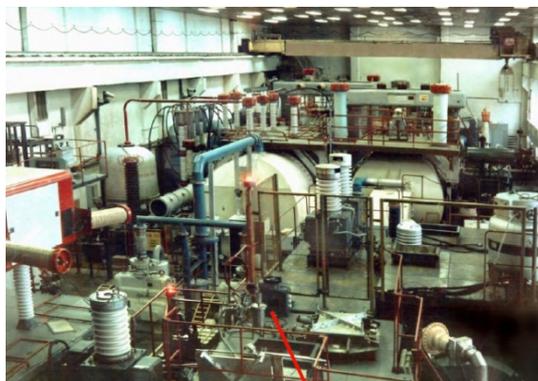


Рис. 14. Лазер КС-10 в ГНИИЛЦ «Радуга»

Одновременно разрабатывались оптические системы формирования, локации, наведения мощного лазерного излучения на объекты (НПО «Астрофизика», ГОИ им. С.И. Вавилова (лаб. П.П. Захарова)).

Лазерные программы в СССР координировал Научно-технический совет, возглавляемый академиками Н.Г. Басовым и Е.П. Велиховым, они находились под пристальным вниманием Правительства СССР, непосредственно Министра обороны СССР Д.Ф. Устинова и Министра оборонной промышленности С.А. Зверева.

Новые направления создания лазеров

Начался XXI век, усилия ученых стали сосредотачиваться на других направлениях разработки и применения лазеров. Это, прежде всего:

- информационные системы. Данное направление возглавляет ректор Университета ИТМО, член-корреспондент РАН, профессор В.Н. Васильев [25];
- лазерная химия и лазерная биофотоника. При участии 12 стран Европы в Германии создается рентгеновский лазер на свободных электронах с длительностью импульсов менее 100 фс и длинами волн (при перестройке) от 0,05 до 6 нм (основные участники разработки – Германия и Россия);
- лазерный термоядерный синтез;
- нанофотоника;
- солнечная энергетика – преобразование солнечной энергии в лазерное излучение.

Остановимся на работах ГОИ им. С.И. Вавилова по применению лазеров в солнечной энергетике [26]. Идея получения электроэнергии за счет солнечного излучения и передачи ее по лучу лазера особенно привлекательна при создании электростанции космического базирования на геостационарных спутниках, поскольку она лишена недостатков традиционных солнечных электростанций: энергия доступна практически круглосуточно, не зависит от погодных условий, может быть передана практически в любой район поверхности Земли, включая северные территории (рис. 15).

В настоящее время разработками в области солнечной энергетики и преобразования солнечной энергии в лазерное или микроволновое излучение интенсивно занимаются США, Япония и Евросоюз.

Ученые ГОИ им. С.И. Вавилова выдвинули идею преобразования солнечной энергии с помощью фуллерен-кислород-йодного лазера (ФОИЛ) (Патент Российской Федерации № 2181224 от 20.06.2000 г., авторы – О.Б. Данилов, И.М. Белоусова, А.А. Мак).

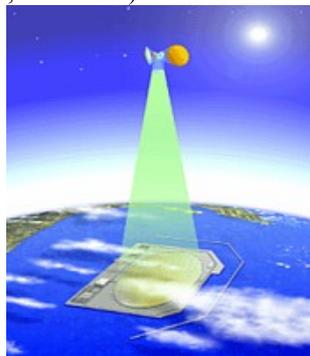


Рис. 15. Новое направление солнечной энергетики – электростанция космического базирования

Уникальность идеи состоит в использовании фуллерена – нового наноматериала, обладающего широким спектром поглощения в ультрафиолетовой и видимой области спектра. Фуллерен – это открытая в 1985 г. многоатомная молекула, состоящая из атомов углерода. Открытие фуллеренов отмечено Нобелевской премией 1996 г. (Р.Ф. Керл (Rise Univ, USA), Г. Крото (Univ. of Sussex, England), Р. Смолли (Rise Univ, USA)). Наиболее интересен для применения фуллерен C_{60} , состоящий из 60 атомов углерода, расположенных на сферической поверхности в вершинах 20 шестигранников и 12 пятигранников (рис. 16).

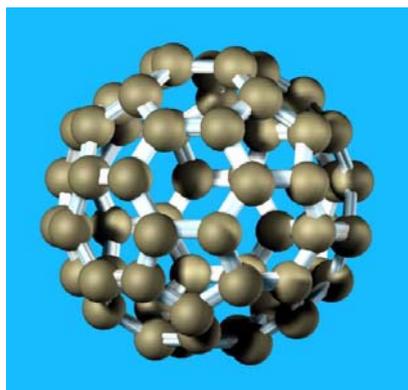


Рис. 16. Молекула фуллерена

Идея преобразования солнечной энергии в лазерное излучение состоит в следующем: солнечное излучение с плотностью потока $1,3 \text{ кВт/м}^2$ поглощается молекулами фуллерена, нанесенными на пористую поверхность, через которую проходит молекулярный кислород. Фотовозбужденные молекулы фуллерена передают свою энергию молекулам кислорода, образуя синглетный кислород (эффективность этого процесса составляет 96%). Синглетный кислород в состоянии ${}^1\Delta_g O_2$ передает свою энергию атомам йода, возбуждая их в состояние $5^2I^*_{1/2}$, с которого затем происходит генерационное излучение при переходе $5^2I^*_{1/2} \rightarrow 5^2I_{3/2}$ с длиной волны $\lambda=1,315 \text{ мкм}$. В целом квантовая эффективность передачи энергии от возбужденного фуллерена к йоду близка к единице. Учитывая энергетические потери на преобразование поглощенных и излученных квантов, а также коэффициент поглощения фуллеренами излучения Солнца, можно считать, что общий коэффициент преобразования солнечной энергии в лазерное излучение ФОИЛ может достигать 20–30%.

Впервые ФОИЛ с оптической накачкой был создан в ГОИ в 2003 г. (группа В.М. Киселева) и является единственным в мире лазером такого типа. В настоящее время ведется работа по исследованию и совершенствованию конструкции ФОИЛ. Выполнен экспериментальный стенд с ФОИЛ с накачкой имитатором солнечного излучения со следующими характеристиками: пиковая мощность 40 кВт, средняя мощность излучения 30 Вт, частота повторения импульсов 30 Гц (рис. 17).

Разработана конструкция лазера с разделенными областями накачки и генерации, которая использует проток кислорода через пористую фуллереновую поверхность, – возможный прототип лазера для преобразования солнечной энергии (рис. 18) [27]. Высказаны и теоретически обосновываются новые идеи о преобразовании солнечной энергии с помощью кислород-йодного лазера при условии возможно-

сти снятия вырождения с запрещенных переходов кислорода (О.Б. Данилов), что позволит в будущем существенно облегчить конструкцию «солнечного» лазера.



Рис. 17. Экспериментальный стенд с фуллерен-кислород-йодным лазером с накачкой имитатором солнечного излучения

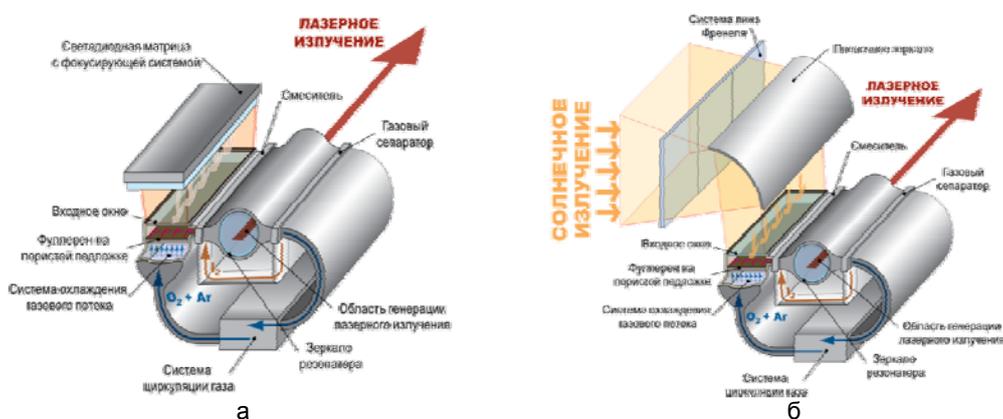


Рис. 18. Исследовательский лазер с оптической накачкой имитатором солнечного излучения (светодиодная матрица) (а); лазер с прямой солнечной накачкой для орбитальной электростанции и демонстрационного эксперимента (б)

Необходимо отметить, что создание электростанции на космическом объекте для преобразования солнечной энергии в лазерное излучение и доставки его на Землю требует разработки сложнейших оптических и оптоэлектронных систем, систем доставки и монтажа всех этих устройств на геостационарные спутники.

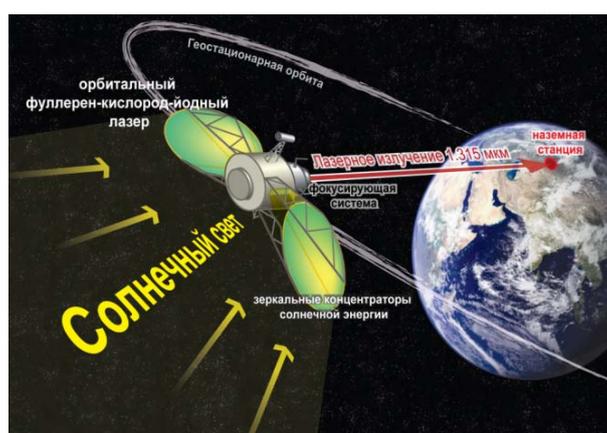


Рис. 19. Состав орбитальной лазерной энергетической системы

На рис. 19 представлены в качестве общей иллюстрации состав орбитальной лазерной энергетической системы:

- орбитальный фуллерен-кислород-йодный лазер мощностью 1 ГВт, размещаемый на геостационарной орбите высотой около 36 000 км;
- зеркальный космический концентратор солнечной энергии пленочного типа суммарной площадью 2,56 м²;

- лазерно-оптическая адаптивная система формирования угловой расходимости до 10^{-7} рад и сверхточного наведения на Землю (10^{-8} рад);
- энергетическая наземная станция приема и преобразования лазерного луча в электрическую энергию.

Воплощение идеи создания такой станции, предложенной ГОИ им. С.И. Вавилова, требует участия многих научных и производственных организаций России, а также совместных усилий с международным сообществом ученых и конструкторов многих стран, таких как США, Евросоюз, Япония. Это, безусловно, проект будущего, проект молодого поколения ученых, аспирантов и студентов.

Заключение

Итак, обратив внимание к истории создания лазеров, мы видим, как человечество двигалось и двигается от миллиджоулей и милливатт первых лазеров к мегаджоулям и мегаваттам современных лазеров и гигаваттам будущих лазерных систем. Расширяются сферы применения лазеров. Область лазерной физики и техники неисчерпаема, хотя и, безусловно, усложняется. *Per aspera ad astra!*

Автор благодарит заведующего кафедрой лазерной техники и биомедицинской оптики, профессора В.Ю. Храмова за предоставленные материалы об истории кафедры.

References

1. Krokhin O.N. *50 let kvantovoi elektronike* [50 years to quantum electronics]. *Kak eto bylo. Vospominaniya sozdatelei otechestvennoi lazernoi tekhniki*. [As it was. Memoirs of developers of native laser technology] Moscow, LAS Publ., 2010, ch.2, pp. 5–16.
2. Krukov P.G. *Femtosekundnye impul'sy. Vvedenie v novuyu oblast' lazernoi fiziki* [Femtosecond pulses. Introduction to a new area of laser physics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008, 208 p.
3. Basov N.G., Prokhorov A.M. *Primenenie molekulyarnykh puchkov dlya radiospektroskopicheskogo izucheniya vrashchatel'nykh spektrov molekul* [Application of molecular beams to radiospectroscopic study of rotational molecules spectra]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1955, vol. 27, pp. 431–438.
4. Maiman T. *The Laser Odyssey*. Laser Pr., 2000, 216 p.
5. Schawlow A., Townes C. Infrared and optical masers. *Physical Review*, 1958, vol.112, no. 6, pp. 1940–1949. doi: 10.1103/PhysRev.112.1940
6. Maiman T. Stimulated optical radiation in Ruby. *Nature*, 1960, vol. 186, no. 4736, pp. 493-494. doi: 10.1038/187493a0
7. Javan A., Bennett W.R., Herriott, D.R. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture. *Physical Review Letters*, 1961, vol. 6, no. 3, pp. 106-110. doi: 10.1103/PhysRevLett.6.106
8. Belousova I.M. The laser in the USSR: the first steps. *Phys. Usp.*, 2011, vol.54, pp. 73–75. doi: 10.3367/UFNe.0181.201101g.0079
9. Leontovich A.M. *Kak byl sdelan pervyi lazer v Moskve* [How the first laser was made in Moscow]. *Kak eto bylo. Vospominaniya sozdatelei otechestvennoi lazernoi tekhniki*. [As it was. Memoirs of developers of native laser technology]. Moscow, LAS Publ., 2010, pp. 36–40.
10. Lhazov L.D. Kvantovo-mekhanicheskie kogerentnye usiliteli i generator luchistoi energii («lazery») [Quantum-mechanical coherent amplifiers and generators of radiant energy ("Lasers")]. *Optiko mekhanicheskaya promyshlennost'*, 1961, no. 1, pp. 48–55.
11. Belousova I.M. Kvantovo-mekhanicheskie generatory i usiliteli sveta, osnovannyye na elektronnom возбуждении газов и паров металла [Quantum mechanical generators and light amplifiers based on electronic excitation gases and metal vapors]. *Optiko mekhanicheskaya promyshlennost'*, 1961, no. 10, pp. 39–45.
12. Belousova I.M., Vanyukov M.P., Danilov O.B. et. al. Gazovyi opticheskii kvantovyi generator [Gas optical quantum generator]. *Optiko mekhanicheskaya promyshlennost'*, 1964, no. 1, pp. 5–10.
13. Mak A.A., Mak An.A. *Lazery v GOI im. S.I. Vavilova: ot pervogo rubinovogo do noveishikh razrabotok* [Lasers in SOI named by S.I. Vavilov: from the first ruby to latest developments]. *Kak eto bylo. Vospominaniya sozdatelei otechestvennoi lazernoi tekhniki*. [As it was. Memoirs of developers of native laser technology]. Moscow, LAS Publ., 2010, pp. 49–64.
14. Зарубин П.В., Польских С.Д. *Iz istorii sozdaniya vysokoenergeticheskikh lazerov i lazernykh system v SSSR* [The history of development of high-energy lasers and laser systems in USSR]. Available at: <http://www.physics-online.ru/PaperLogos/6337/%C2%FB%F1%EE%EA%EE%FD%ED%E5%F0%E3%E5%F2%E8%F7%E5%F1%EA%E8%E5%20%EB%E0%E7%E5%F0%FB.pdf>. (accessed 04.02.2014).
15. Rautian S.G., Sobel'man I.I. Fotodissotsiatsiya molekul kak sposob polucheniya sredy s otritsatel'nyim koeffitsientom pogloshcheniya [Photodissociation of molecules as a way of obtaining a medium with a negative absorption coefficient]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1961, vol. 41, p. 2018.
16. Kasper J. V. V., Pimentel G.C. Atomic iodine photodissociation laser. *Applied Physics Letters*, 1964, vol. 5, no. 11, pp. 231-233. doi: 10.1063/1.1723603
17. Basov N.G., Zuev V.S., Kirillov G.A. et. al. *Monoimpul'snyi fotodissotsionnyi lazer na energiyu 1–2 MJ* [Monopulse photodissociation laser at 1-2 MJ energy]. Moscow, P.N. Lebedev Physics Institute Publ., 1992, 30 p. (In Russian, unpublished)
18. Zuev V.S., Katulin V.A. Scientific foundations of powerful photodissociation lasers (history of research in the 1960s at the Division of Quantum Radiophysics of the P N Lebedev Physics Institute). *Quantum Electron*, 1997, vol. 24, no. 12, pp. 1073–1080. doi: 10.1070/QE1997v02n12ABEH001112
19. Zarubin P.V. *Lazernoe oruzhie – mif ili real'nost'?* *Moshchnye lazery v SSSR i v mire* [Laser weapons – Myth or Reality? High-power lasers in the USSR and in the World]. Vladimir, Tranzit-iks Publ., 2009, 322 p.

20. Kirillov G.A. *Issledovanie povedeniya veshchestva v ekstremal'nykh usloviyakh* [Study of the matter behavior under extreme conditions]. Sarov, RFYATS-VNIIEF Publ., 2008, 309 p.
21. Patel C.K.N. Interpretation of CO₂ optical maser experiments. *Physical Review Letters*, 1964, vol. 12, no. 21, pp. 588–590. doi: 10.1103/PhysRevLett.12.588
22. Vitteman V.D. *CO₂-laser* [CO₂-laser]. Moscow, Mir Publ., 1990, 360 p.
23. Zarubin P.V., Orlov V.K., Cheburkin N., Sukharev E. “Terra” and “Omega” – Large-scale pioneer soviet high energy laser programs (1965–1977). *Proc. of SPIE*, 2007, vol. 6735, pp. xv–xxvii.
24. Kosminov N.S. *Vospominaniya o prozhitom* [Memoirs about the past]. Moscow, 1996, 145 p.
25. Belousova I. M., Bulaev V.D., Grigorev V.A. et. al. Complex studies of formation and transportation of high-power CO₂-laser radiation along a horizontal atmospheric path. *Proc. SPIE*, 1994, vol. 2096, P. 14.
26. Bespalov V.G., Vasiliev V. N., Efimov Yu.N. et.al. 10 GW femtosekundnaya lazernaya sistema FS-1 – ustroystvo i kharakteristiki [10 GW femtosecond laser system FS-1 – apparatus and characteristics]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2005, no. 7 (23), pp. 74–79.
27. Belousova I.M., Danilov O.B., Kiselev V.M., Mak A.A. Conversion of solar energy to laser beam by fullerene-oxygen-iodine laser. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7822, art. no. 78220N. doi: 10.1117/12.890934



Белуцова Инна Михайловна – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Лауреат Государственной премии СССР, начальник отдела – главный научный сотрудник отдела «Нанофотоника» ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова», профессор кафедры «Оптика лазеров» Университета ИТМО. Области научных интересов – лазерная физика и техника, нелинейная оптика, нанофотоника, атомная и молекулярная спектроскопия. Автор более 250 научных работ в области лазерной физики, лазерной фотоники и нанофотоники. Руководитель крупных работ по государственным заказам, грантам РФФИ. Руководила работами по проектам Международного научно-технического центра. Член диссертационного совета СПбГУ, член диссертационного совета и НТС ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова», ученый секретарь НТС НИИ Лазерной физики ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова». Под научным руководством И.М. Белоусовой подготовлено 15 кандидатов физико-математических наук. И.М. Белоусова является руководителем секции «Нанофотоника и биофотоника» Международной конференции «Оптика лазеров».

Inna M. Belousova – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Science Worker of the Russian Federation, Laureate of the

State Prize of the USSR, Section head – Chief scientific researcher of Nanophotonics Section of «Vavilov State Optical Institute», JSC, Professor of Laser Optics Department of ITMO University. Scientific areas: Laser Physics and Technology, Nonlinear Optics, Nanophotonics, Atomic and Molecular Spectroscopy. The author of over 250 scientific papers in the field of Laser Physics, Laser Photonics and Nanophotonics. Head of major works on state contracts, grants of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR). Project supervisor of the International Science and Technology Center. Dissertation Board Member in Saint Petersburg State University, and Dissertation Board Member and Member of Science&Technology Council in «Vavilov State Optical Institute», JSC, Scientific Secretary of Science&Technology Council in S&R Institute of Laser Physics of «Vavilov State Optical Institute», JSC. 15 candidates of physical and mathematical sciences were trained under scientific supervision of I.M. Belousova. I.M. Belousov is the Head of Nanophotonics and Biophotonics Section at the International Laser Optics Conference.

Белуцова Инна Михайловна

- доктор физ.-мат. наук, профессор; начальник отдела – главный научный сотрудник, ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия; профессор, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, belousova.i.m@gmail.com

Inna M. Belousova

- D.Sc., Professor; Section head – chief scientific researcher, «Vavilov State Optical Institute», Saint Petersburg, Russia; Professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia, belousova.i.m@gmail.com

Принято к печати 07.02.2014

Accepted 07.02.2014