

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

К истории создания лазера

И.А. Щербаков

Сделана попытка объективно отразить вклад советских учёных в становление лазерной физики, тенденция преуменьшения которого, по мнению автора, имеет место в иностранной литературе. Наряду с представлением об индуцированном излучении квантовой системой, предложения метода трёх уровней и открытого резонатора являются краеугольными камнями лазерной физики. Основополагающим являются также предложения использования в качестве активной среды полупроводников, метода инъекции носителей тока через $p-n$ -переход, лазеров на основе двойных гетероструктур, лазерного термоядерного синтеза.

PACS numbers: 01.65.+g, 42.55-f, 42.60.-v

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201101e.0071

Наука интернациональна, а её развитие, как правило, осуществляется коллективами учёных. С этой точки зрения не столь важно, кто персонально внёс наибольший вклад в открытие, изменившее облик окружающего нас мира. Однако существуют такие понятия, как ответственность ученика перед учителем, обязательства перед ушедшими, обаяние непредсказуемости научных результатов. Всё это не даёт возможности беспристрастно рассматривать результаты великих открытий в отрыве от имён людей, их свершивших. Материалы настоящей статьи докладывались на нескольких международных конференциях и вызвали определённый интерес, прежде всего, различием в интерпретации некоторых важных моментов развития лазерной физики с обсуждаемыми в сделанных на юбилейных конференциях докладах зарубежных учёных, посвящённых пятидесятилетию создания лазера. Тенденция преуменьшения вклада российских исследователей, которая в той или иной мере имела место всегда, особенно усилилась в юбилейный год (см., например, [1]). Автор далёк от мысли считать, что это результат осознанных действий. Причиной, по-видимому, является недостаточное внимание иностранных учёных к публикациям в русскоязычных научных журналах, хотя со второй половины 1950-х годов ведущие советские журналы по физике начал переводить на английский язык Американский институт физики [2] и эти журналы (по данным Юджина Гарфилда — основателя Института научной информации, США) имели весьма высокие импакт-факторы (см. [3, с. 189]) и, соответственно, международные научные рейтинги (см.

[4, с. 568]). В настоящей статье ставилась задача соблюсти объективность в изложении и интерпретации исторических фактов. Тем не менее автор заранее приносит извинения тем, кто сочтёт, что с поставленной задачей он не справился или справился не в должной мере.

Итак, днём рождения лазера следует считать 16 мая 1960 г. Эта дата стоит на рабочей тетради Т.Н. Меймана (1927–2007 гг.), учёного, справедливо считающегося отцом лазера. Однако дело в том, что у лазера, в отличие от ребёнка, отцов много. Любое научное открытие рождается не на пустом месте, ему предшествуют глубокие фундаментальные исследования многих учёных. Тогда как в получении конечного результата — в создании источника когерентного оптического излучения — приоритет Т.Н. Меймана ни у кого не вызывает сомнения. Этот результат был опубликован в [5] в августе 1960 г. (рис. 1). Мейманом был обнаружен, правильно интерпретирован и оценён эффект сужения спектральной линии и увеличения интенсивности излучения на несколько порядков. В созданном им приборе содержались все три необходимых и достаточных компонента для получения эффекта генерации оптического когерентного излучения. Это активная среда с инверсной населённостью (синтетический кристалл рубина), система оптической накачки и открытый резонатор, обеспечивающий положительную обратную связь и превращающий усилитель оптического излучения в генератор.

В Физическом институте им. П.Н. Лебедева лазер был запущен 18 сентября 1961 г. М.Д. Галаниным, А.М. Леонтовичем и З.А. Чижиковой (рис. 2) [6]. Некоторые очевидцы говорят, что ранее это было сделано в Государственном оптическом институте (ГОИ), однако документальные подтверждения этого нам не известны*. Группа М.Д. Галанина целенаправленно шла к построению рубинового лазера и провела пионерские исследования свойств лазерного излучения.

И.А. Щербаков. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация
Тел. (499) 135-41-48, 503-87-00
Факс (499) 132-02-70
E-mail: director@gpi.ru

Статья поступила 28 октября 2010 г.

* Архивные материалы о создании рубинового лазера в ГОИ в июне 1961 г. публикуются в этом номере УФН на с. 79. (Примеч. ред.)

Stimulated Optical Radiation in Ruby

Schawlow and Townes¹ have proposed a technique for the generation of very monochromatic radiation in the infra-red optical region of the spectrum using an alkali vapour as the active medium. Javan² and Sanders³ have discussed proposals involving electron-excited gaseous systems. In this laboratory an optical pumping technique has been successfully applied to a fluorescent solid resulting in the attainment of negative temperatures and stimulated optical emission at a wave-length of 6943 Å.; the active material used was ruby (chromium in corundum).

A simplified energy-level diagram for triply ionized chromium in this crystal is shown in Fig. 1. When this material is irradiated with energy at a wave-length of about 5500 Å., chromium ions are excited to the 4F_2 state and then quickly lose some of their excitation energy through non-radiative transitions to the 2E state⁴. This state then slowly decays by spontaneously emitting a sharp doublet the components of which at 300° K. are at 6943 Å. and 6929 Å. (Fig. 2a). Under very intense excitation the population of this metastable state (2E) can become greater than that of the ground-state; this is the condition for negative temperatures and consequently amplification via stimulated emission.

To demonstrate the above effect a ruby crystal of 1 cm. dimensions coated on two parallel faces with silver was irradiated by a high-power flash lamp;

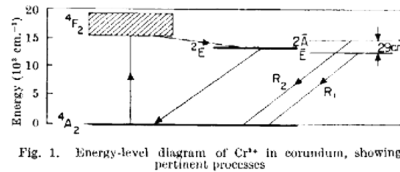


Fig. 1. Energy-level diagram of Cr³⁺ in corundum, showing pertinent processes

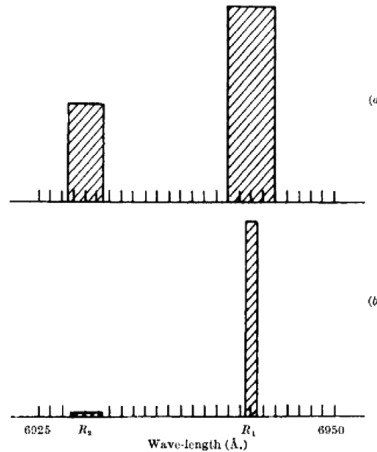


Fig. 2. Emission spectrum of ruby: a, low-power excitation; b, high-power excitation

the emission spectrum obtained under these conditions is shown in Fig. 2b. These results can be explained on the basis that negative temperatures were produced and regenerative amplification ensued. I expect, in principle, a considerably greater ($\sim 10^4$) reduction in line width when mode selection techniques are used¹.

I gratefully acknowledge helpful discussions with G. Birnbaum, R. W. Hellwarth, L. C. Levitt, and R. A. Satten and am indebted to I. J. D'Haenens and C. K. Asawa for technical assistance in obtaining the measurements.

T. H. MAIMAN

Hughes Research Laboratories,
A Division of Hughes Aircraft Co.,
Malibu, California.

¹ Schawlow, A. L., and Townes, C. H., *Phys. Rev.*, **112**, 1940 (1958).

² Javan, A., *Phys. Rev. Letters*, **3**, 87 (1959).

³ Sanders, J. H., *Phys. Rev. Letters*, **3**, 86 (1959).

⁴ Maiman, T. H., *Phys. Rev. Letters*, **4**, 564 (1960).

Рис. 1. Статья Т. Меймана "Stimulated Optical Radiation in Ruby" [2] (1960 г.).



Рис. 2. Создатели первого рубинового лазера в Москве — М.Д. Галанин, А.М. Леонтович, З.А. Чижикова.

Следует отметить, что кристалл рубина стал материалом квантовой электроники до появления лазера в значительной степени благодаря фундаментальным работам А.А. Маненкова и А.М. Прохорова по спектроскопии этого кристалла, в которых была исследована тонкая структура спектра парамагнитного резонанса иона Cr³⁺ в рубине [7].

В работе Г.М. Зверева, Л.С. Корниенко, А.А. Маненкова и А.М. Прохорова [8] был предложен и создан парамагнитный усилитель и генератор на рубине.

Как уже отмечалось, лазер родился не на пустом месте, и отец у него был далеко не один. Трудно выбрать начало отсчёта. Считается, и с достаточным основанием, что первый камень был заложен в 1916 г. А. Эйнштейном [9]. А. Эйнштейн исследовал статистическое равновесие между молекулами и тепловым излучением, пространственная спектральная плотность энергии U_ω которого определяется формулой Планка. Для каждой пары уровней молекулы E_1 и $E_2 = E_1 + \hbar\omega$ он ввёл вероятность $B_{12}U_\omega$ поглощения и вероятности A_{21} и $B_{21}U_\omega$ спонтанного и индуцированного (или вынужденного) излучения: здесь A_{21} , B_{21} и B_{12} — коэффициенты, кото-

рые стали называть коэффициентами Эйнштейна:

$$dn_1 = B_{12}U n_1 dt,$$

$$dn_2 = (A_{21} + B_{21}U) n_2 dt,$$

где n_1 , n_2 — число частиц в первом и во втором состоянии; A_{21} — вероятность спонтанного перехода $E_2 \rightarrow E_1$, B_{12} — вероятность вынужденного перехода $E_1 \rightarrow E_2$, B_{21} — вероятность вынужденного перехода $E_2 \rightarrow E_1$, при этом $B_{21} = B_{12} = B$ и $B = \pi^2 c^3 / (\hbar\omega^3) A$.

Таким образом, рассмотрение А. Эйнштейна отвечает равновесному случаю, т.е. вынужденное излучение является необходимым условием термодинамического равновесия между системой, описываемой распределением Больцмана, и излучением, описываемым формулой Планка. Природа спонтанного и вынужденного излучения подробно обсуждается в методической заметке В.Л. Гинзбурга [10]. Утверждается, что спонтанное излучение имеет не только квантовую природу, но и "заведомо имеет место в классической теории и, вообще говоря, не может считаться квантовым явлением в большей мере, чем поглощение или индуцированное

испускание". Представление об индуцированном излучении является одним из краеугольных камней квантовой электроники и физики лазеров.

В работах П. Дирака в середине 1920-х годов были разработаны подробные теоретические представления о процессах излучения и поглощения света. В результате было строго обосновано существование индуцированного излучения.

Следующий шаг был сделан советским учёным-оптиком В.А. Фабрикантом. В 1939 г. в ФИАНе им была защищена докторская диссертация, посвящённая изучению механизма излучения газового разряда. В частности, в ней обсуждались эксперименты, доказывающие существование отрицательной абсорбции и возможность увеличения интенсивности излучения в направлении возбуждающего пучка. Полный текст диссертации опубликован в Трудах Всесоюзного электротехнического института [11].

Позднее В.А. Фабрикантом совместно с Ф.А. Бутаевой и М.М. Вудынским в 1951 г. была подана заявка на изобретение оптического усилителя, а в 1959 г. ими было получено авторское свидетельство [12]. Этому же авторскому коллективу Госкомитетом по изобретениям был выдан диплом № 12 с приоритетом от 18 июня 1951 г. с формулой открытия: "Установлено неизвестное ранее явление усиления электромагнитных волн при прохождении через среду, в которой концентрация частиц или их систем на верхних энергетических уровнях, соответствующих возбуждённым состояниям, избыточна по сравнению с концентрацией в равновесном состоянии". Таким образом, речь о необходимости инверсной населённости для получения эффекта усиления оптического излучения шла задолго до реализации идеи лазерного эффекта. Однако инверсная населённость — необходимое, но не достаточное условие для получения генерации. Оптикам было непривычно понятие положительной обратной связи в оптическом диапазоне. Поэтому в то время лазер создан не был. Радиоспектроскописты же хорошо знали, что надо сделать для превращения усилителя в генератор: ввести положительную обратную связь, что и было реализовано сначала в радиодиапазоне с помощью объёмного резонатора. Кроме того, в цитируемых выше работах В.А. Фабриканта не содержится указаний на то, что вынужденное излучение представляет собой когерентный процесс. По-видимому, это обстоятельство также привело к задержке распространения принципов квантовой электроники микроволнового диапазона на оптический диапазон. Эта проблема подробно обсуждается в [13].

Важнейшим шагом в становлении лазерной физики явилось создание мазера. Идея о принципиальной возможности создания молекулярного генератора была выдвинута Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым в [14]. В работе этих же авторов [15] обсуждаются широкие возможности применения этого прибора. Создан же первый молекулярный генератор американскими учёными Дж. Гордоном, Х. Цайгером и Ч. Таунсом [16]. Разработке мазера посвящена докторская диссертация Н.Г. Басова "Молекулярный генератор" (рис. 3).

Необходимо заметить, что в диссертации Н.Г. Басова содержатся ссылки на работу группы Ч. Таунса. Утверждения, которые иногда и сегодня высказываются в отечественной печати, о том, что Н.Г. Басов и А.М. Прохоров и одновременно с ними Ч. Таунс

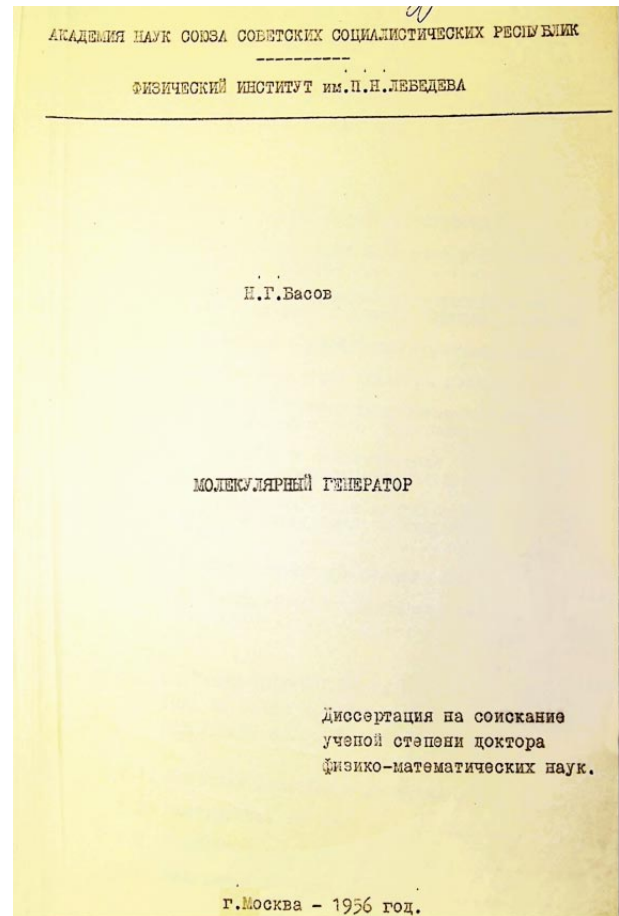


Рис. 3. Первая страница докторской диссертации Н.Г. Басова "Молекулярный генератор".

создали предшественника лазера — квантовый генератор микроволнового излучения, или мазер, — не совсем точно. Приоритет в непосредственной экспериментальной реализации мазера принадлежит группе Таунса.

История зарождения и развития квантовой электроники достаточно объективно обсуждалась в статьях, опубликованных в специальном выпуске *Journal of modern optics* [17], посвящённом пятидесятилетию квантовой электроники. Роль советских учёных нашла отражение в недавно опубликованной работе Н.В. Карлова, О.Н. Крохина и С.Г. Лукишовой [18]. В ней содержится большое количество ссылок на работы, проведённые в Советском Союзе. В 2010 г. был выпущен сборник, также содержащий ссылки на основополагающие, выполненные в СССР работы, внёсшие существенный вклад в основы лазерной физики [19].

Совершенно естественно, что после создания источника когерентного излучения в микроволновой области встал вопрос о продвижении в коротковолновую и, в частности, в видимую области спектра. Было ясно, что основным препятствием на этом пути является резкое возрастание вероятности спонтанных переходов, в связи с чем возникают трудности в достижении инверсной населённости и невозможность реализовать известными методами положительную обратную связь.

В работе [20] (поступила в редакцию 1 ноября 1954 г.) Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым был предложен метод создания инверсной населённости не путём селекции

возбуждённых и невозбуждённых молекул в молекулярных пучках, как это было сделано в молекулярном генераторе, а посредством воздействия на молекулы внешнего электромагнитного излучения на резонансной частоте. Этот метод, впоследствии получивший название метода трёх уровней, оказался универсальным. Он позволяет при выполнении соответствующих требований достигать инверсной населённости в любых многоуровневых системах, независимо от величины энергии кванта (рис. 4а).

Несколько позднее аналогичная идея была высказана Н. Бломбергенем [21]. Метод трёх уровней сейчас лежит в основе работы всех лазеров с так называемой оптической накачкой.

Столь же успешно было преодолено и второе препятствие — отсутствие подходящих резонаторов для оптического диапазона. Проблема состояла в том, что объёмные резонаторы, широко использовавшиеся в радиофизике, не могли быть тогда созданы в оптике по той причине, что размеры объёмного резонатора должны быть соизмеримыми с длиной волны генерируемого излучения. Как известно, длины волн излучения оптического диапазона составляют менее 1 мкм, что делало в то время применение объёмных резонаторов в оптическом диапазоне абсолютно бессмысленным (сегодняшний уровень технологии позволяет это сделать). В 1958 г. А.М. Прохоров предложил использовать в качестве резонатора пару плоских параллельных пластин-зеркал, которые были названы открытым резонатором [22]. В

данном случае длина волны излучения оказывается много меньше размеров резонатора. Были получены условия самовозбуждения и выражение для добротности системы. Такая пара зеркал использовалась ранее в оптике в качестве весьма распространённого инструмента, так называемого интерферометра Фабри–Перо, но совершенно для других целей. Несколькими месяцами позднее идея открытого резонатора была высказана в [23] Ф. Шавловым и Ч. Таунсом и независимо предложена в патенте Р. Дике [24].

Создание открытого резонатора снимало последнее ограничение для продвижения в оптическую область спектра и, по существу, завершило собой построение фундамента лазерной физики. Таким образом, теоретические работы, в которых рассматривались основополагающие идеи создания лазеров, относятся к 50-м годам прошлого века [22, 23, 25].

Первый лазер на кристаллах рубина, как уже отмечалось, был создан в США [5] в 1960 г. Вскоре А. Джаваном, У.Р. Беннетом и Д.Р. Хэрристонем был запущен газовый гелий-неоновый лазер [26]. А далее в течение одного года сообщения о получении генерации следовали десятками. В этих исследованиях, по сути, были проведены лишь демонстрации эффекта и фундаментальные исследования свойств лазерного излучения. Тем не менее эти ранние работы дали возможность осознать, может быть не в полной мере, колоссальные возможности практического применения лазеров. Однако для реализации уникальных свойств лазеров на практике и их широкого применения только фундаментальных исследований в области физики лазеров было недостаточно. Требовалось выполнение ещё одного условия, крайне важного и необходимого, а именно: развитие совершенно новых технологий, которых не существовало тогда ни в СССР, ни в других странах, включая США.

Необходимо было организовать поиск новых материалов, причём во всех мыслимых агрегатных состояниях — твёрдом (кристаллы и стёкла), жидком, газообразном и плазменном, — обладающих подходящими для генерации схемами уровней и скоростями релаксации, а также требовалось разработать методы получения этих материалов. При этом предъявлялись очень высокие требования к химической чистоте и структурной однородности материалов, значительно более высокие, чем ранее. Кроме того, необходимо было разработать методы прецизионной механической обработки новых материалов, например методы полировки оптических поверхностей с небывало высоким классом точности, с соблюдением строгой параллельности и высокой плоскостности. Необходимо было создать новые источники оптической накачки, новые методы напыления прецизионных зеркал. За этими технологиями тянулись другие: разработка нового технологического оборудования, создание особо чистых реактивов, методик и приборов для контроля физических свойств материалов и много других совершенно необходимых компонентов. Всё это вместе образует так называемые высокие технологии. По существу, необходимо было создать разветвлённую исследовательскую и промышленную инфраструктуру, без которой развитие лазеров и их продвижение в практику были бы невозможны.

В рекордно короткие сроки, в пределах одного десятилетия, в СССР была создана сеть новых институтов, конструкторских бюро и производств, подготов-

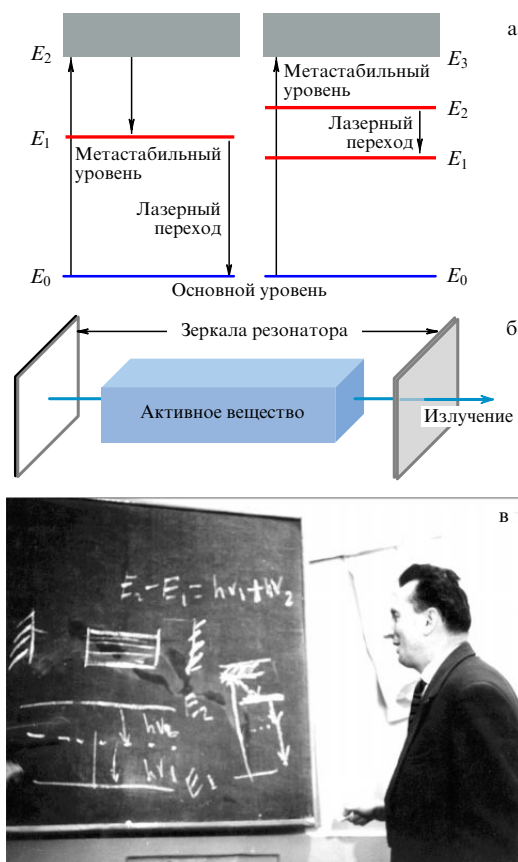


Рис. 4. (а) Принципиальная схема трёхуровневого метода накачки. (б) Открытый резонатор. (в) А.М. Прохоров выступает с докладом о принципах работы лазера.



Рис. 5. (а) Лауреаты Нобелевской премии по физике 1964 г. "за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на мазерно-лазерном принципе" (слева направо): Ч. Таунс, Н.Г. Басов, А.М. Прохоров. (б) Нобелевская медаль А.М. Прохорова.

лены кадры специалистов-лазерщиков и специалистов смежных областей [27].

В результате за короткий срок СССР превратился, наряду с США, в одну из двух лазерных сверхдержав.

В 1964 г. Нобелевская премия по физике была присуждена советским учёным Николаю Геннадиевичу Басову и Александру Михайловичу Прохорову и американскому учёному Чарльзу Таунсу (рис. 5). Часто встречающиеся утверждения о том, что Нобелевская премия была ими получена за создание мазеров или лазеров являются, по меньшей мере, неточными. Она была присуждена за "фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на мазерно-лазерном принципе". Персональный выбор лауреатов Нобелевским комитетом представляется абсолютно правильным и обоснованным.

Трудно найти другой такой пример приборов, работающих на одном и том же принципе, но столь кардинально отличающихся внешне. Так, на рис. 6 изображена созданная в Японии лазерная установка на стекле с неодимом, характерные размеры которой составляют несколько сотен метров, и типичный полупроводниковый лазер размером в несколько миллиметров. Новые полупроводниковые структуры с квантовыми точками являются результатом развития нанотехнологий, и степень их миниатюризации ещё выше.

Полупроводниковым лазерам следует уделить особое внимание. Они нашли наиболее широкое применение, в том числе и в повседневной жизни. Идея использовать полупроводник в качестве активной среды впервые была опубликована Н.Г. Басовым, Б.М. Вулом и Ю.М. Поповым в 1959 г. ещё до появления рубинового лазера [25] и была зарегистрирована Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР с приоритетом 7 июля 1958 г. В работе [25] рассматривалась возможность использования электронных переходов между зоной проводимости (валентной зоной) и донорными (акцепторными) примесными уровнями полупроводника для получения электромагнитного излучения с помощью механизма индуцированного излучения, подобно тому, как это имеет место в молекулярном генераторе. Было также предложено для получения инверсии попытаться использовать электрический ток.

В 1961 г. вышла работа Н.Г. Басова, О.Н. Крохина и Ю.М. Попова "Получение состояний с отрицательной температурой в р–n-переходах вырожденных полупроводников" [28]. Термин "отрицательная температура", который применялся на ранних стадиях развития лазерной физики, означал неравновесное инверсное состояние системы. В этой работе был предложен метод инжекции носителей тока через р–n-переход. Он оказался чрезвычайно плодотворным и привёл к созданию лазерных диодов, нашедших самые широкие практические применения.

Запущен же первый полупроводниковый лазер был американским учёным Робертом Н. Холлом [29]. В работе советских учёных [30], наблюдалось сужение линии люминесценции, что, по-видимому, было связано с вынужденным излучением. Однако отсутствие обрат-

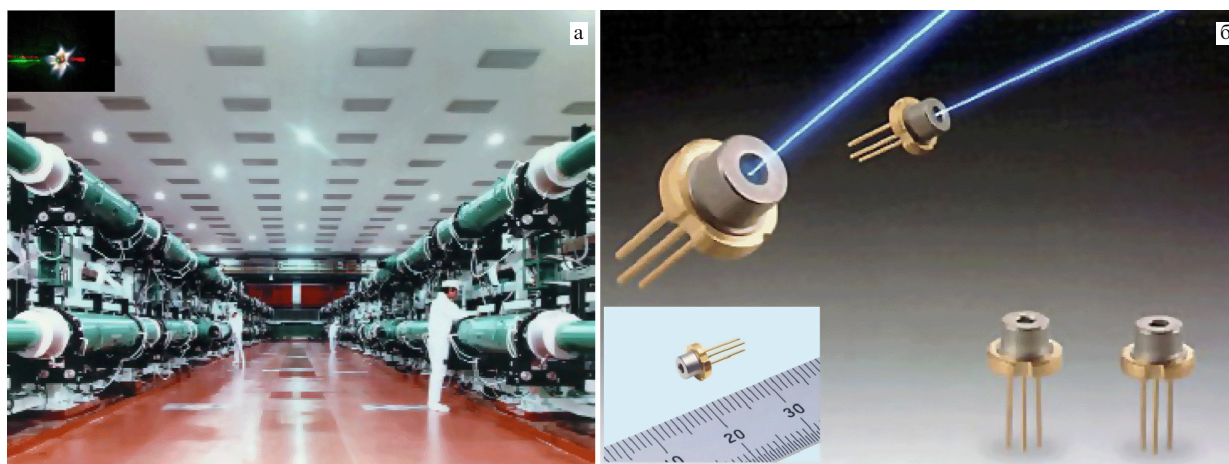


Рис. 6. (а) Лазер "Gekko" (Япония). (б) Полупроводниковые лазеры.

ной связи, т.е. зеркал, не позволило получить эффект генерации.

На широко применяемые полупроводниковые лазеры на основе двойных гетероструктур Ж.И. Алфёровым и Р.Ф. Казариновым было получено авторское свидетельство № 181737 с приоритетом 30 марта 1963 г. [31]. Независимо от них, но несколькими месяцами позднее американским учёным Г. Кремером также была предложена концепция лазеров на основе двойных гетероструктур [32]. В 1970 г. группой Алфёрова был создан первый полупроводниковый лазер на основе гетероструктуры в системе AlGaAs–GaAs, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре. За основополагающие работы в области информационных и коммуникационных технологий Ж. Алфёрову, Г. Кремеру и Д. Килби была вручена Нобелевская премия по физике 2000 г. Вклад Ж. Алфёрова и Г. Кремера в решение общей проблемы сформулирован так: "за развитие полупроводниковых гетероструктур, применяемых в скоростной и оптоэлектронике".

За прошедшие 50 лет было предложено и реализовано большое количество различных типов лазеров:

- твердотельные лазеры;
- полупроводниковые лазеры;
- газовые лазеры;
- лазеры на красителях;
- лазеры на парах металлов;
- эксимерные лазеры;
- химические лазеры;
- лазеры на свободных электронах;
- лазеры с диодной накачкой, в том числе волоконные.

Однако, несмотря на такое разнообразие лазеров, в них всегда присутствуют три необходимых компонента: активная среда, система накачки и положительная обратная связь.

Современную жизнь трудно себе представить без лазеров. Широкое применение лазеры нашли, в частности, в таких областях медицины, как общая хирургия, урология, офтальмология [33].

Характерные диапазоны параметров лазеров, применяемых, например, в медицине, таковы:

- спектральный диапазон охватывает три предела: от ультрафиолетового (УФ) ($\approx 0,1$ мкм) до инфракрасного (ИК) (≈ 10 мкм);
- диапазон плотности энергии — три порядка: от 1 Дж см^{-2} до 10^3 Дж см^{-2} ;
- диапазон плотностей мощности — 18 порядков: от $10^{-3} \text{ Вт см}^{-2}$ до $10^{15} \text{ Вт см}^{-2}$;
- временной диапазон — 16 порядков: от непрерывного излучения (≈ 10 с) до фемтосекундных импульсов ($\approx 10^{-15}$ с).

На рисунке 7 представлен фемтосекундный офтальмологический лазер "Фемто Визум" и лазерный хирургический комплекс "Лазурит", медицинские приборы, разработанные в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН). Лазерные импульсы малой длительности при взаимодействии с тканью стимулируют развитие различных нелинейных процессов, таких как оптический пробой, многофотонное поглощение, образование и развитие плазмы, генерация и распространение ударных волн. Разнообразие механизмов взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями позволяет проводить уникальные операции, неосу-

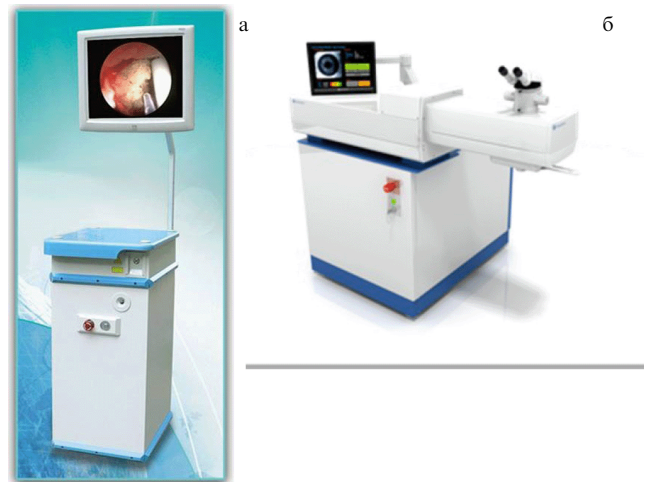


Рис. 7. (а) Разработанный в ИОФ РАН лазерный хирургический комплекс "Лазурит". (б) Фемтосекундный офтальмологический лазер "Фемто Визум".

ществимые никакими другими способами. У истоков применения лазеров в медицине в нашей стране стояли Н.Г. Басов и А.М. Прохоров, наладившие самые тесные связи с медиками.

В последнее время получили развитие волоконные лазеры, которые были предложены американским учёным Е. Снитцером вскоре после появления лазера на рубине [34]. Однако сначала они не получили практически никакого распространения из-за неэффективности обычно применяемой тогда ламповой накачки. В 1974 г. была осуществлена накачка волоконного лазера лазерным диодом, что дало толчок развитию лазеров подобного типа [35]. В настоящее время большой международной корпорацией "IPG Photonics", основанной и возглавляемой российским учёным В.П. Гапонцевым,



Рис. 8. Лазерный технологический комплекс на основе мощного волоконно-оптического лазера компании IPG Photonics (www.ipgphotonics.com).

выпускается серия волоконных лазеров с диодной накачкой, мощность которых достигает 50 кВт [36]. Эти лазеры относительно компактны и отличаются большой надёжностью и простотой в работе (рис. 8). Диодная накачка также вдохнула новую жизнь в твердотельные лазеры, существенно повысив их надёжность и эффективность.

В последние тридцать лет в практику широко вошла волоконная оптическая связь. Земной шар покрылся сетью волоконных световодов длиной 1000 млн километров. Обеспечивают эту связь полупроводниковые лазеры и волоконные усилители. Скорость передачи информации в коммерческих линиях связи достигает $1-2 \text{ Тбит с}^{-1}$, в экспериментальных — до 70 Тбит с^{-1} . К 2030 г. предполагается достичь скорости 1 Пбит с^{-1} ($10^{15} \text{ бит с}^{-1}$). За выдающийся вклад в исследование волоконных световодов для оптической связи китайский учёный Чарльз Као в 2009 году удостоен Нобелевской премии по физике

Лидером в создании мощных твердотельных лазеров являются США. В Ливерморской лаборатории разработаны лазеры с активными элементами большого размера из нового материала — оптической керамики, с составом, аналогичным составу кристалла иттрий-алюминиевого граната с неодимом. Достигнута мощность до 70 кВт [37].

Фирмой "Нортроп–Грумман" построен демонстрационный макет транспортабельной лазерной системы с мощностью генерации более 105 кВт и с качеством пучка лучше трёх дифракционных пределов [38, 39].

В самостоятельное направление выделился лазерный термоядерный синтез. Создание лазеров модулированной добротности с наносекундной длительностью импульса [40] позволило по-новому подойти к проблеме получения высокотемпературной плазмы, используя её быстрый импульсный нагрев короткой вспышкой мощного пространственно когерентного излучения, сконцентрированного на небольшой мишени, содержащей изотопы водорода. Это предложение, выдвинутое Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным в 1963 г. [41], положило начало инерциальному термоядерному синтезу, интенсивно исследуемому в развитых странах. Самый мощный лазер для этих целей создан в Ливерморской лаборатории США. На сегодня энергия одного импульса в УФ-области спектра (третья гармоника излучения

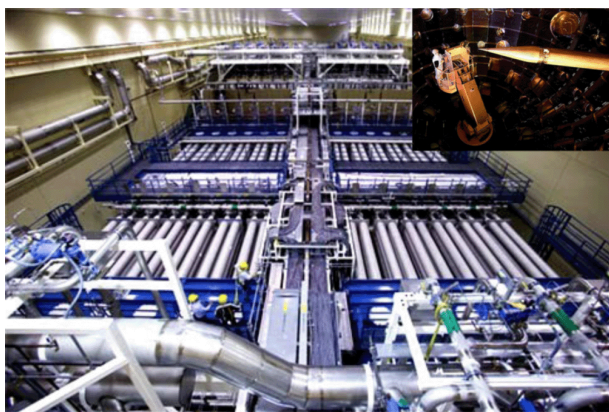


Рис. 9. Лазерная установка для исследования лазерного термоядерного синтеза *National Ignition Facility* в Ливерморской лаборатории (США).

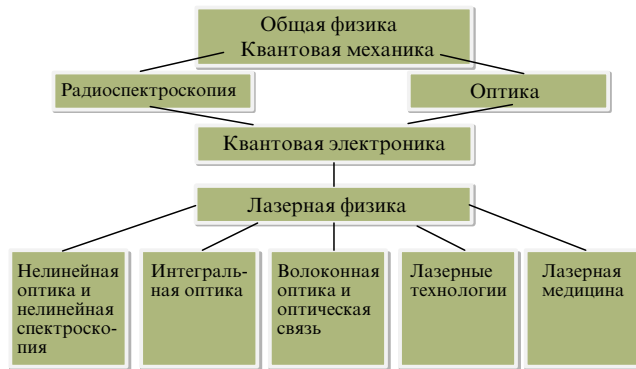


Рис. 10. Генезис и развитие лазерной физики.

неодимового лазера) составляет 1,8 МДж при длительности импульса несколько наносекунд. Это может оказаться достаточным для поджига термоядерной реакции (рис. 9).

В России работы по лазерному термоядерному синтезу в 1990-е годы были в значительной степени свёрнуты. В настоящее время подготовлена программа по созданию установки мегаджоульного уровня УФЛ-2М при длительности импульса 3 нс второй гармоники неодимового лазера [42]. Установку предполагается построить в Российском федеральном ядерном центре "Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ ВНИИЭФ) (г. Саров) — в организации, которой удалось сохранить и даже усовершенствовать экспериментальную базу в течение, мягко говоря, неблагоприятных для российской науки годов.

В повседневной жизни мы сталкиваемся с лазерами повсеместно. Без лазеров немислим Интернет, устройства для записи, воспроизведения, считывания информации.

Интересно отметить, что слово "лазер" появилось в 1959 г. до создания лазера. LASER — аббревиатура от "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". Придумал это название замечательному прибору Р.Г. Гулд [43].

На рисунке 10 сделана попытка фрагментарно проследить развитие лазерной физики. Усилиями радиоспектроскопистов и оптиков, опиравшихся на фундаментальные физические результаты, была создана новая область науки — квантовая электроника. В рамках этой науки родилась лазерная физика, которая, в свою очередь, породила новые области науки и техники. Сегодня очевидно, что результаты, за которые Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и Ч.Таунс получили Нобелевскую премию, безусловно изменили облик окружающего нас мира. Кроме того, эта премия породила десяток, если не больше, других Нобелевских премий в той или иной степени связанных с использованием лазера.

И последнее. В популярной литературе лазер часто ассоциируют с гиперболоидом инженера Гарина, представляя его как страшное оружие. Это в корне неправильно. Лазерная энергия слишком умна и элегантна. Лазер — не орудие разрушения, лазер — орудие созидания.

В заключение автор выражает благодарность Т.С. Комаровой и С.В. Гарнову за помощь в подготовке материалов и оформлении статьи.

Список литературы

1. Hecht J *Opt. Eng.* **49** 091002 (2010)
2. Амбегаокар В "Совместная программа школы Ландау и Американского института физики по переводу научной литературы" *УФН* **178** 1359 (2008) [Ambegaokar V "The Landau school and the American Institute of Physics translation program" *Phys. Usp.* **51** 1287 (2008)]
3. Garfield E *Citation Indexing — Its Theory and Application in Science, Technology, and Humanities* 2nd ed. (Philadelphia: ISI Press, 1983)
4. Гинзбург В Л "К истории журнала "Успехи физических наук" (вступительное слово)" *УФН* **179** 562 (2009) с. 568 [Ginzburg V L "On the history of Uspekhi Fizicheskikh Nauk (Opening address)" *Phys. Usp.* **52** 530 (2009)]
5. Maiman T H *Nature* **187** 493 (1960)
6. Галанин М Д, Леонтович А М, Чижикова З А *ЖЭТФ* **43** 347 (1962) [Galanin M D, Leontovich A M, Chizhikova Z A *Sov. Phys. JETP* **16** 249 (1963)]
7. Маненков А А, Прохоров А М *ЖЭТФ* **28** 762 (1955) [Manenkov A A, Prokhorov A M *Sov. Phys. JETP* **1** 611 (1955)]
8. Зверев Г М и др. *ЖЭТФ* **34** 1660 (1958) [Zvepev G M et al. *Sov. Phys. JETP* **7** 707 (1959)]
9. Einstein A *Deutsche Phys. Gesellschaft Verhandl.* **48** 318 (1916); *Phys. Gesellschaft Zürich Mitteil.* **18** 47 (1916) [*The Collected Papers of Albert Einstein* Vol. 6 (Princeton: Princeton Univ. Press, 1996) p. 363, 381; Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 3 (М.: Наука, 1966) с. 386; с. 393]
10. Гинзбург В Л *УФН* **140** 687 (1983) [Ginzburg V L *Sov Phys. Usp.* **26** 713 (1983)]
11. Фабрикант В А *Труды Всесоюз. электротехнического института* **41** 236 (1940)
12. Фабрикант В А, Вудынский М М, Бутаева Ф А, Авторское свидетельство 123209 с приоритетом от 18 июня 1951 г.
13. Крохин О Н *УФН* **181** 3 (2011) [Krokhin O N *Phys. Usp.* **54** (1) (2010)]
14. Басов Н Г, Прохоров А М *ЖЭТФ* **27** 431 (1954)
15. Басов Н Г, Прохоров А М *УФН* **57** 485 (1955)
16. Gordon J P, Zeiger H J, Townes C H *Phys. Rev.* **95** 282 (1954)
17. *J. Mod. Opt.* **52** (12) (2005)
18. Karlov N V, Krokhin O N, Lukishova S G *Appl. Opt.* **49** F32 (2010)
19. Багаев С Н, Водопьянов К Л, Дианов Е М, Крохин О Н, Маненков А А, Пашинин П П, Щербаков И А (Сост.) *Начало лазерной эры в СССР. Сборник статей* (М.: ФИАН, 2010)
20. Басов Н Г, Прохоров А М *ЖЭТФ* **28** 249 (1955) [Basov N G, Prokhorov A M *Sov. Phys. JETP* **1** 184 (1955)]
21. Bloembergen N *Phys. Rev.* **104** 324 (1956)
22. Прохоров А М *ЖЭТФ* **34** 1658 (1958) [Prokhorov A M *Sov. Phys. JETP* **7** 1140 (1958)]
23. Schawlow A L, Townes C H *Phys. Rev.* **112** 1940 (1958)
24. Dicke R H, US Patent 2,851,652 (application date: May 21, 1956, patented date: September 9, 1958)
25. Басов Н Г, Вул Б М, Попов Ю М *ЖЭТФ* **37** 587 (1959) [Basov N G, Vul B M, Popov Yu M *Sov. Phys. JETP* **10** 416 (1960)]
26. Bennett W R, Javan A, US Patent 3,149,290 (application date: December 28, 1960, patented date: September 15, 1964)
27. Зарубин П В *Квантовая электроника* **32** 1048 (2002) [Zarubin P V *Quantum Electron.* **32** 1048 (2002)]
28. Басов Н Г, Крохин О Н, Попов Ю М *ЖЭТФ* **40** 1879 (1961) [Basov N G, Krokhin O N, Popov Yu M *Sov. Phys. JETP* **13** 1320 (1961)]
29. Hall R N et al. *Phys. Rev. Lett.* **9** 366 (1962)
30. Наследов Д Н, Рогачев А А, Рыбкин С М, Царенков Б В *ФТТ* **4** 1062 (1962) [Nasledov D N, Rogachev A A, Ryvkin S M, Tsarenkov B V *Sov. Phys. Solid State* **4** 2449 (1963)]
31. Алферов Ж И, Казаринов Р Ф, Авторское свидетельство 181737 с приоритетом от 30 марта 1963 г.
32. Кроemer H *Proc. IEEE* **51** 1782 (1963)
33. Щербаков И А *УФН* **180** 661 (2010) [Shcherbakov I A *Phys. Usp.* **53** 631 (2010)]
34. Snitzer E *Phys. Rev. Lett.* **7** 444 (1961)
35. Stone J, Burrus C A *Appl. Opt.* **13** 1256 (1974)
36. IPG Photonics, www.ipgphotonics.com
37. Heller A *Science Technology Review* (4)10 (2006)
38. Goodno G D et al. *Opt. Lett.* **31** 1247 (2006)
39. www.st.nortropgrumman.com
40. McClung F J, Hellwarth R W *J. Appl. Phys.* **33** 828 (1962)
41. Basov N G, Krokhin O N, in *Quantum Electronics: Proc. of the third Intern. Congress, Paris, 1963* (Eds P Grivet, N Bloembergen) (New York: Columbia Univ. Press, 1964) p. 1373
42. Гаранин С Г и др. *УФН* **181** (2011) (в печати)
43. Gould R G, in *The Ann Arbor Conf. on Optical Pumping, The Univ. of Michigan, USA, 1959* (Eds P A Franken, R H Sands) p. 128

Development history of the laser

I.A. Shcherbakov

A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
ul. Vavilova 38, 119991 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-499) 135-41 48, (7-499) 503-87 00
Fax (7-499) 132-02 70
E-mail: director@gpi.ru

An attempt is made at objectively assessing the contribution which Soviet scientists made to laser physics becoming what it has become and which the author believes is underestimated abroad. Together with the concept of induced radiation, the three-level method and the open resonator were to become cornerstone proposals for laser physics, as were semiconductor active media, carrier injection through the p-n junction, double heterostructure lasers and laser thermonuclear fusion.

PACS numbers: **01.65. +g**, **42.55 -f**, **42.60. -v**

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201101e.0071

Bibliography — 43 references

Received 28 October 2010

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **181** (1) 71–78 (2011)

Physics – Uspekhi **53** (1) (2011)