

Международная академия нефти и газа, International academy of oil and gas¹ (Россия, Russia)

Российская академия естествознания, Russian academy of natural science² (Россия, Russia)

Лазеры. История их создания и применение

Lasers. The history of their creation and application

Фазлыева Элина Маратовна, Fazlyeva Elina Maratovna

Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich^{1,2}

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник¹, профессор²

УДК 535 Шифр научной специальности ВАК: 1.3.19 – Лазерная физика.

E-mail: elina_fazlyeva@mail.ru, kemalov@mail.ru

Аннотация: В данной работе рассматривается история возникновения первых лазеров. 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. Также, описаны конкретные примеры применения лазерных технологий в разных областях. С появлением лазеров начались исследования по повышению стабильности их частоты. На основе лазеров были созданы источники электромагнитных волн оптического диапазона с высокой стабильностью частоты. Это способствовало применению лазеров в военной отрасли для навигации, точного определения расстояния до объекта и скорости объекта. Уже сейчас лазерные технологии решают задачи по запуску космических и/или крылатых ракет и управление их полетом. Лазеры нашли широкое распространение в медицине в качестве бескровного скальпеля в офтальмологии, при лечении кожных заболеваний. При помощи лазерных технологий удалось разработать методику, позволяющую определять ядра клеток и различать здоровые клетки от злокачественных, т.е. проводить биопсию в процессе операции. В области экологии лазерные локализаторы применяются для контроля распределения загрязнений в атмосфере на различных высотах, определяют скорости воздушных течений, состав и температуру атмосферы. Лазерные технологии применяют для изготовления тонких пленок из газообразного сырья путем химического осаждения с применением световой энергии. В повседневной жизни каждый человек так же встречается с лазерами. Особенно широко распространены полупроводниковые (диодные) лазеры, которые используются в принтерах, музыкальных проигрывателях, компьютерах, фонарях, детских игрушках.

Abstract: In this paper, the history of the first lasers is considered. The history of the formation of a new direction of science - quantum electronics, associated with the discovery of masers and lasers by US scientists (Ch. Towns) and the USSR (N.G. Basov and A.M. Prokhorov). The world's first ruby laser, developed by T. Meiman, is presented. Also, specific examples of the use of laser technologies in various fields are described. With the advent of lasers, research began to improve the stability of their frequency. Based on lasers, sources of electromagnetic waves of the optical range with high frequency stability were created. This contributed to the use of lasers in the military industry for navigation, accurate determination of the distance to the object and the speed of the object. Laser technologies are already solving the tasks of launching space and/or cruise missiles and controlling their flight. Lasers are widely used in medicine as a bloodless scalpel in ophthalmology, in the treatment of skin diseases. With the help of laser technologies, it was possible to develop a technique that allows to determine the nuclei of cells and distinguish healthy cells from malignant ones, i.e. to conduct a biopsy during surgery. In the field of ecology, laser locators are used to control the distribution of pollutants in the atmosphere at various altitudes, determine the speed of air currents, the composition and temperature of the atmosphere. Laser technologies are used for the manufacture of thin films from gaseous raw materials by chemical deposition using light energy. In everyday life, everyone also meets with lasers. Semiconductor (diode) lasers are especially widespread, which are used in printers, music players, computers, flashlights, and children's toys.

Ключевые слова: лазер; история создания лазеров; Теодор Майман; принцип действия лазера; применение лазеров; лазеры в военном деле; лазеры в медицине.

Keywords: laser; history of the creation of lasers; Theodore Maiman; the principle of laser operation; the use of lasers; lasers in military affairs; lasers in medicine.

1 Введение (Introduction)

Лазер как устройство появился в результате слияния двух достижений науки и техники – квантовой физики и радиотехники. Квантовая физика напрямую связана с теорией о свете, природа возникновения которого занимала умы выдающихся мыслителей с древних времен. Свет – это величайшая ценность,

которой одарила нас природа, это необходимое условие существования растений, животных и человека. Световые лучи отражаются и преломляются, они могут усиливать и ослаблять друг друга, огибать препятствия, нагревать предметы, порождать электрический ток, обладать химическим воздействием. Все эти удивительные явления света изучались с древних времен. В начале XX века появилась теория света, согласно которой свет проявляет себя как волна или как частица в зависимости от условий наблюдений. Данная теория и послужила в 1954 г. созданию совершенно нового генератора радиоволн – мазера. Одним из выдающихся научно-технических достижений XX века несомненно является разработка лазера. Его создание в 1960 г. дало начало бурному развитию всей лазерной техники. Лазер (оптический квантовый генератор) – устройство, генерирующее когерентные электро-магнитные волны за счет вынужденного испускания или вынужденного рассеяния света активной средой, находящейся в оптическом резонаторе. Лазер является устройством, преобразующим различные виды энергии (электрическую, световую, химическую, тепловую и т.п.) в энергию когерентного электро-магнитного излучения оптического диапазона. Действие лазера основано на вынужденном испускании фотонов под действием внешнего электромагнитного поля. Лазер является источником монохроматического когерентного света с высокой направленностью светового луча [1].

Introduction

The laser as a device appeared as a result of the merger of two achievements of science and technology – quantum physics and radio engineering. Quantum physics is directly related to the theory of light, the nature of which has occupied the minds of prominent thinkers since ancient times. Light is the greatest value that nature has given us, it is a necessary condition for the existence of plants, animals and humans. Light rays are reflected and refracted, they can strengthen and weaken each other, bend around obstacles, heat objects, generate an electric current, have a chemical effect. All these amazing phenomena of light have been studied since ancient times. At the beginning of the XX century, the theory of light appeared, according to which light manifests itself as a wave or as a particle, depending on the conditions of observation. This theory served in 1954 to create a completely new radio wave generator – a maser. One of the outstanding scientific and technical achievements of the twentieth century is undoubtedly the development of a laser. Its creation in 1960 gave rise to the rapid development of all laser technology. A laser (optical quantum generator) is a device that generates coherent electro-magnetic waves due to the forced emission or forced scattering of light by an active medium located in an optical resonator. A laser is a device that converts various types of energy (electrical, light, chemical, thermal, etc.) into the energy of coherent electro-magnetic radiation of the optical range. The laser action is based on the forced emission of photons under the influence of an external electromagnetic field. The laser is a source of monochromatic coherent light with a high directivity of the light beam [1].

2 История создания лазеров (The history of the creation of lasers)

Прежде чем появился лазер, было сделано множество различных открытий и проведено немало испытаний, которые впоследствии стали фундаментом для разработки первого в мире излучателя.

В 1900 году Планк вывел соотношение между энергией и частотой излучения, он предположил, что излучение света веществом происходит неделимыми порциями, и энергия излучаемой порции зависит от частоты света. Он говорил о том, что энергия может излучаться или поглощаться только в определенных порциях энергии, которые в итоге он назвал квантами.

В 1905 году Эйнштейн выпустил свою статью о фотоэлектрическом эффекте, в который предположил, что свет также доставляет свою энергию кусками, в этом случае дискретные квантовые частицы теперь называют фотонами.

В 1917 году Эйнштейн сформировал теорию о «Вынужденном излучении». Он предположил, что, помимо поглощения и испускания света спонтанно, электроны могут быть направлены для испускания света определенной длины волны.

26 апреля 1951 года: Чарльз Хард Таунс из Колумбийского университета, сидя на скамейке в Вашингтоне, задумывает идею создания своего прибора для микроволнового усиления путем стимулированного излучения, который он назвал «мазером». Работая с Гербертом Зейгером и аспирантом Джеймсом П. Гордоном, Таунс демонстрирует первый «мазер» в Колумбийском университете. Аммиачный «мазер» - первое устройство, основанное на предсказаниях Эйнштейна, получает первое усиление и генерацию электромагнитных волн путем вынужденного излучения. Прибор генерировал луч света, мощностью около 10 нВт, длина волны которого составляла чуть более 1 см. Это был настоящий прорыв в оптоэлектронике 1954 года.

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева в Москве Н. Г. Басов и А. М. Прохоров пытаются спроектировать и построить осцилляторы. В 1955 году они предлагают новый метод получения отрицательного поглощения, называемый методом накачки электронов.

В 1956 году Николас Блумберг из Гарвардского университета разрабатывает микроволновый твердотельный мазер.

В октябре 1962 г. Ник Холоньяк-младший, научный сотрудник лаборатории General Electric Co в Сиракузах, штат Нью-Йорк, публикует свои работы на «видимом красном» лазерном диоде GaAsP (галлий-арсенид-фосфид), компактном, эффективном источнике видимого когерентного света, что является основой для красных светодиодов, используемых в таких повседневных продуктах, как компактдиски, DVD-плееры и мобильные телефоны.

В 1964 году Таунс, Басов и Прохоров удостоены Нобелевской премии по физике за их «фундаментальную работу в области квантовой электроники, которая привела к построению осцилляторов и усилителей на основе принципа мазер-лазер».

16 мая 1960 г. Теодор Х. Майман, физик из Hughes Research Laboratories в Малибу, штат Калифорния, строит первый лазер, используя цилиндр из синтетического рубина размером 1 см в диаметре и 2 см длиной, с концами, покрытыми серебром. Майман использует фотолампы в качестве источника лазерного насоса. Впоследствии эти лазеры были названы «рубиновыми» и были очень длительное время самыми популярными. Интересна дальнейшая судьба первого образца рубинового лазера, созданного Теодором Майманом. В Национальном музее американской истории есть фотографии одной из возможных версий первого рубинового лазера Теодора Маймана (рис. 1) [2].



Рисунок 1. Фотографии одной из возможных версий первого рубинового лазера Теодора Меймана (Национальный музей американской истории) [2]

В ноябре 1960 года Питер П. Сорокин и Мирек Стивенсон из Исследовательского центра «IBM Thomas J. Watson» демонстрируют урановый лазер, четырехступенчатое твердотельное устройство.

В 1962 году Халворф с Фредом МакКлунгом – младшим доказывает свою лазерную теорию, генерируя пиковые мощности в 100 раз больше, чем обычные рубиновые лазеры, используя электрически закрытые жалюзи Керра. Метод гигантского формирования импульса называется дублированием. Тогда, с помощью этого лазера провели сварку пружин для часов [3].

3 Принцип действия газового лазера (The principle of operation of the gas laser)

Газовый лазер – лазер, в котором в качестве активной среды используется возбужденные электрическим током газы или пары (ионы атомов или молекул). Изменять свойства излучения газовых лазеров можно следующими способами: различными способами возбуждения; изменения параметров газа (давление, температура, состав); конструктивным исполнением. Активные среды однородны и не имеют потерь, в связи с чем качество излучения выше, чем в других типах лазера. Терморегуляция активной среды осуществляется быстрой замены газа, что позволяет в непрерывном режиме добиться высоких мощностей. Габариты такого типа лазеров значительно больше, чем других типов: из-за низких давлений в среде (10^{-10} Па) необходимы большие длины зон усиления. Спектр излучения варьируется от УФ-диапазона (~ 100 нм) до диапазона сверхвысоких частот (~ 2 мм). Инверсия заселенностей достигается за счёт преобладающего увеличения заселенности верхнего лазерного уровня при следующих процессах:

– Возбуждение частиц при столкновениях с электроном (столкновения первого рода) инициируемое газовым разрядом ($e + \text{He} \rightarrow e + \text{He}^*$);

– Передача возбуждения от одной частицы к другой (столкновения второго рода). Максимальная скорость процесса определяется близостью возбужденных уровней энергии молекул ($\text{He}^* + \text{Ne} \rightarrow \text{He} + \text{Ne}^*$);

– Возбуждение при прямой или ступенчатой ионизации ($\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}^* + 2e$);

- Возбуждение молекулярных состояний с помощью оптической накачки. В виду узкого спектра поглощений, такой способ возбуждения применяется в газовых лазерах высокого давления и лазеров дальнего ИК-диапазона (CO₂ лазер);
- Возбуждение атомных состояний через фотодиссоциацию (разложение молекул под действием электромагнитного излучения) молекул. Используют импульсные ксеноновые лампы;
- Возбуждение колебательно-возбуждённых состояний молекул за счёт химических реакции.

Перечисленные процессы имеют место при возбуждении активной среды с помощью электрического тока (газовый разряд, непрерывное возбуждение от нескольких миллиампер до 100 А, импульсное возбуждение от 100 А до 1000 А, с помощью релятивистских электронных пучков), оптической накачкой (преимущественно для лазера дальнего ИК-диапазона) и химических реакций (тепловая реакция, фотодиссоциация). Активная среда газовых лазеров формируется из любого газообразного при комнатной температуре элемента или их смеси (H₂, Ne, Ne⁺, Kr²⁺, N₂O и др.), большего числа элементов в парообразном состоянии (пары металлов He-Cd, He-Kr-Hg), большего числа молекул веществ (CH₃OD, CO₂, NOCL и др.) Достоинство газа, как рабочего тела лазера – высокая оптическая однородность, недостаток – малые удельные энергетические характеристики. Наиболее распространённым активным веществом являются смеси нейтральных атомов. Излучающими частицами в таком лазере являются атомы элемента, имеющего наибольшее количество метастабильных уровней. При большом числе метастабильных уровней трудно создать инверсию заселённости относительно нижних уровней и какого-то одного из выбранных, что решается введением донорного газа в рабочий объём. Атомы внедрённого газа активно возбуждаются от внешних источников энергии и передаёт запасённую энергию атомам другого элемента. Среди возможных активных сред из двухкомпонентных смесей нейтральных атомов можно упомянуть He-Ne и He-Xe, где активным веществом является Ne и Xe, соответственно, а He является донорным газом.

Конструктивно схема газового лазера показана на рис. 2. Активное вещество заполняет целиком лазерную трубку, в связи с чем зона возбуждения привязана к габаритным размерам трубки. Типичные размеры 0,3-1,5 м в длину и 0,1-2 см в диаметре. В зависимости от типа резонатора трубка может оканчиваться окнами, установленными под углом Брюстера относительно оси пучка. Окна могут повышать качество излучения через линейную поляризацию.

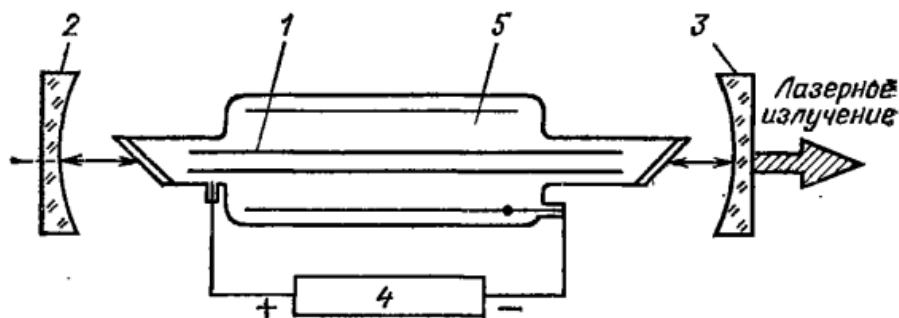


Рисунок 2. Конструкция газового лазера:

- 1 – лазерная трубка с длиной l и диаметром d ; 2 – зеркало резонатора; 3 – полупрозрачное зеркало резонатора; 4 – источник питания; 5 – смесь газов [3]

Обратная связь представляет собой оптический резонатор, являющийся ничем иным, как резонатором Фабри-Перо. Существует два типа резонатора открытый и закрытый. Открытый резонатор представляет собой два внешних зеркала, на которые через окна падает излучение. При этом, оптические элементы, повышающие качество излучения, можно установить непосредственно в резонатор. Такая схема повышает потери энергии излучения в резонаторе. В схеме закрытого резонатора, зеркала устанавливаются вместо окон, излучение при этом не поляризовано. В данной схеме потери отсутствуют, но зеркала могут быть подвержены разрушению под воздействием процессов внутри активной среды.

Из резонатора излучение можно выводить с помощью установки полупрозрачного зеркала, отверстия в зеркале или путём дифракции на краю одном из зеркал и внедрением на пути лазерного пучка прозрачной пластины, через отражение.

Отвод тепловых потерь происходит с помощью воздушного охлаждения при незначительной мощности и водяного охлаждения при средней и высокой мощности, или быстрой замены газа. Рабочее тело аппарата охлаждения насосом подаётся к внешней стороны стеклянной трубки, равномерно охлаждая её по всей площади [4].

4 Применение лазеров (Application of lasers)

До сегодняшнего дня лазеры играют значительную роль в офтальмологии, хирургии, дерматологии и стоматологии, а также во многих других областях. Центральным технологическим компонентом в урологии является эндоскоп. Лазеры могут быть перемещены через операционный канал эндоскопа или через альтернативный инструмент, вставленный в тело человека, для проведения необходимых терапевтических вмешательств. В урологии лазеры широко используются, являясь инструментом первого выбора в некоторых областях, таких как эндоскопическое лечение камней или литотрипсия. Первый клинический случай лазерного лечения в урологии датируется 1968 годом [5].

Лазерные устройства — это те, которые преобразуют одну форму энергии в фотоны, которые являются электромагнитными излучениями. Следующие семь типов лазеров были определены для их использования в бурении нефтяных и газовых скважин:

- Лазер на фтористом водороде и фториде дейтерия: они имеют рабочий диапазон длин волн 2,6–4,2 микрометра. MIRACLE использовался для испытания пород-коллекторов.

- Химический кислородно-йодный лазер: работает на длине волны 1,315 микрометра. С его помощью можно уничтожать ракеты, что тоже с большой точностью и большой дальностью. Такая высокая точность и дальность действия могут быть успешно использованы для решения ряда проблем со скважиной.

- Лазер на углекислом газе: работает на длине волны 10,6 микрометра со средней мощностью 1 МВт. Он может работать как в непрерывном, так и в импульсном волновом режиме. Однако из-за его большой длины волны затухание происходит через волоконную оптику.

- Лазер на угарном газе: работает на длине волны 5–6 микрометров. Он также может работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Его средняя мощность составляет 200 кВт.

- Лазер на свободных электронах: в режиме постоянного тока он может быть настроен на любую длину волны и рассматривается как мощный лазер на будущее. Таким образом, его длину волны можно регулировать в случае отражения, излучения черного тела и т. д.

- Неодимовый: Иттриево-алюминиевый гранатовый лазер: работает на длине волны 1,06 мкм при мощности 4 кВт.

- Фторид криптона (экимер) Лазер: работает на длине волны 0,248 микрометра с мощностью 10 кВт. Он может работать в режиме RP. В этом лазере атомы криптона и фторида в молекуле KrF находятся в возбужденном состоянии. Лазерное механическое долото работает по принципу первого откалывания породы с помощью лазерного луча. Было доказано, что температуры, индуцируемые лазерами, ослабляют породу. Это происходит из-за развития трещин, обезвоживания минералов и испарения, что приводит к увеличению пустого пространства. Обнаружено, что по сравнению с неглазурированной частью различные модули, такие как модуль Юнга, модуль сдвига, объемный модуль и комбинированный модуль породы, были уменьшены. В эти выходные породы затем пробуривается с использованием обычных, используемых в настоящее время методов механического долота. Это достигается более быстрыми и эффективными темпами [6].

Качественно новый этап развития лазерной аналитики связывается с появлением лазеров, генерирующих ультракороткие импульсы (УКИ) – фемтосекундного и аттосекундного диапазонов [7]. Импульсы лазерного излучения пикосекундной и фемтосекундной длительности широко применяют в аналитической спектроскопии вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Так, в работе [8] показано, что использование узкополосного пикосекундного импульса накачки и широкополосного зондирующего импульса фемтосекундной длительности позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум по сравнению с ранее применяемыми методиками ВКР. Это позволяет получать спектры ВКР анализируемых образцов с очень малым временем накопления сигнала. Предложенная схема позволяет также исключить влияние флуоресценции образцов. Одна из особенностей фемтосекундного излучения состоит в том, что оно генерируется в широком спектральном диапазоне. При этом важным фактором при обсуждении применения фемтосекундных лазеров является изменение частоты излучения со временем (чирп). Чирпированный импульс – это такой импульс, в котором различные длины волн неравномерно распределены вдоль огибающей волны импульса. При этом чирп можно наблюдать и как увеличение, и как уменьшение длины волны (или частоты) лазерного излучения со временем при наблюдении излучения как из стационарного положения, так и при прохождении его относительно наблюдателя.

В 2015 году Чинг На Анг из Сингапурского института гражданской, оборонной науки и технологий написал диссертацию о применении высокоэнергетического лазерного оружия, которое будет

использоваться на корабле ВМС, для Военно-морской аспирантуры в Монтерее, Калифорния [9]. Целью проекта является анализ возможности применения лазерного оружия на кораблях класса "Прибрежный боевой корабль ВМС" (LCS). Анализировалось три различных типа лазерных систем, включая твердотельный лазер (SSSL), лазер на свободных электронах (FEL) и волоконно-оптический лазер (FL), где все эти три системы могут генерировать высококачественные лазерные лучи. На рисунках 3-5 представлены данные лазеры [9].



Рисунок 3. Твердотельный лазер. Демонстрация морского лазера [9]



Рисунок 4. Лазерная система на свободных электронах [9]



Рисунок 5. Волоконно-оптические лазеры [9]

Также лазерное оружие разрабатывается в России, но большая часть информации об этих работах засекречена. Российский лазерный комплекс "Пересвет" выполняет задачи противовоздушной и противоракетной обороны и может быть успешно использован в борьбе с беспилотниками. Он может быть использован против любых боеприпасов, в которых используются оптико-электронные устройства, такие как крылатые ракеты и высокоточное оружие. Принцип действия основан на освещении систем оптической разведки, в том числе самолетов и спутников, лазерным лучом. Он может быть использован для прикрытия (камуфляжа) стартовых позиций. По некоторым данным, комплекс также способен поражать орбитальные спутники. Советский Союз разработал ручное лазерное оружие для космонавтов, но на практике это нелетальное оружие никогда не применялось [10].

5 Заключение (Conclusions)

Итак, обратив внимание к истории создания лазеров, мы видим, как человечество двигалось и движется от миллиджоулей и милливатт первых лазеров к мегаджоулям и мегаваттам современных лазеров и гигаваттам будущих лазерных систем.

Список литературы (References):

- [1] Минаев И. В. и др. История развития лазера и особенности его применения // Чебышевский сборник. – 2019. – Т. 20. – №. 4 (72). – С. 423-438.
- [2] Bernatskiy A., Khaskin V. The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries // History of science and technology. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 125-149.

- [3] Валиев А. М., Ласкина Л. Ю. Применение лазеров в военном деле //Аллея науки. – 2018. – Т. 2. – №. 1. – С. 791-803.
- [4] Сафонов Л. Ю. Газовый лазер, принцип действия и область применения // актуальные вопросы современной науки и образования. – 2021. – С. 71-77.
- [5] Gross A. J., Herrmann T. R. W. History of lasers //World journal of urology. – 2007. – Т. 25. – №. 3. – С. 217-220.
- [6] Гуляев Г. Ю. Достижения в науке и образовании 2022: сборник статей II. – 2022.
- [7] Немец В. М., Пастор А. А. Лазеры в аналитике: возможности и перспективы развития импульсных лазеров ультракороткого диапазона // Химическая физика. – 2017. – Т. 36. – №. 2. – С. 70-74.
- [8] David W. Mc. Camant, Kukura P., Mathies R.A. // Appl. Spectrosc. 2003. V. 57. P. 1317.
- [9] Nafisah S. et al. Laser Technology Applications in Critical Sectors: Military and Medical // Journal of Electronic Voltage and Application. – 2021. – Т. 2. – №. 1. – С. 38-48.
- [10] Hnatenko O. S., Semenets V. V., Neofitnyi M. V. The usage of lasers in military equipment. Part1. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020.