

М.И. Баранов

## **АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 9: СОЗДАНИЕ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

*Наведено короткий науково-історичний нарис з усвітньої історії створення квантових генераторів і підсилювачів надвисокочастотного електромагнітного випромінювання (лазерів і мазерів), що знайшли широке застосування в різних галузях науки і техніки.*

*Приведен краткий научно-исторический очерк из всемирной истории создания квантовых генераторов и усилителей сверхвысокочастотного электромагнитного излучения (лазеров и мазеров), нашедших широкое применение в различных областях науки и техники.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современные успехи в создании квантовых генераторов и усилителей электромагнитного излучения сверхвысокой частоты восходят к 20-м годам прошлого 20-го столетия, ставшими начальным периодом формирования в науке нового раздела физики – квантовой электроники, изучающей на атомарном уровне процессы вынужденного излучения твердыми, жидкими и газообразными материалами сверхвысокочастотных когерентных электромагнитных волн под влиянием воздействующего на них внешнего или внутреннего излучения (излучения накачки) [1]. Именно в этот период (в 1916 году) выдающимся немецким физиком-теоретиком Альбертом Эйнштейном (1879-1955 гг.) были разработаны основы теории индуцированного (вынужденного) излучения энергии возбужденными атомами и молекулами вещества [1–3]. Известно, что квантовые генераторы и усилители (лазеры и мазеры) преобразуют энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и ее другие виды) вещества в энергию его монохроматического поляризованного узконаправленного потока электромагнитного излучения светового и радиочастотного диапазонов. Термин "лазер" происходит от английского словосочетания "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" – "усиление света посредством вынужденного излучения", а термин "мазер" – от английского словосочетания "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation" – "усиление микроволн посредством вынужденного излучения" [4]. Одним из важнейших свойств лазерного (мазерного) излучения является высокая степень его монохроматичности, недостижимая для электромагнитного излучения иных источников, основанных на других физических принципах. Это уникальное свойство указанного электромагнитного излучения возникает в результате самосогласованного кооперативного испускания квантов энергии (фотонов) множеством возбужденных атомов рабочего (активного) вещества лазера (мазера). С момента создания в 1954 году американскими физиками Ч. Таунсом, Дж. Гордоном и Г. Цайгером первого молекулярного квантового генератора на аммиаке  $NH_3$  – мазера [5], а в 1960 году американским физиком-экспериментатором Т. Мейманом первого оптического квантового генератора – лазера [5], в качестве активной среды которого использовался кристалл рубина (оксид алюминия  $Al_2O_3$  с неболь-

шой примесью атомов хрома  $Cr$ ), физика и техника лазеров (мазеров) в мире интенсивно развивается и по сей день. Создание лазеров (мазеров) явилось одним из самых замечательных достижений физики второй половины XX века, которое привело к революционным изменениям во многих областях науки и техники. Лазеры используются при решении различных научно-технологических задач общегражданского и военного назначения для генерации излучения оптического частотного диапазона. Мазеры применяются в радиоастрономии, технике космической связи и в ряде радиофизических исследований, где необходимы высокостабильные генераторы волн радиодиапазона [6].

### **1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРОВ И МАЗЕРОВ**

Физической основой работы лазера (мазера) служит квантовомеханическое явление вынужденного (индуцированного) электромагнитного излучения в его рабочем веществе (твердом теле, жидкости, газе или плазме). Излучение лазера (мазера) может быть как непрерывным с постоянной мощностью, так и импульсным, достигающим больших пиковых мощностей в его выходящем электромагнитном пучке. Отметим, что в некоторых схемах рабочий элемент лазера (мазера) может использоваться в качестве промежуточного оптического (микроволнового) усилителя для электромагнитного излучения от другого источника. Некоторые типы лазеров, например лазеры на растворах красителей или полихроматические твердотельные лазеры, могут генерировать целый набор частот электромагнитного излучения (мод оптического резонатора) в широком спектральном диапазоне. Строгое теоретическое обоснование явления вынужденного (индуцированного) электромагнитного излучения веществом в рамках квантовой физики получило в работах выдающегося английского физика-теоретика Поля Дирака (1902-1984 гг.) в период 1927-1930 годов [1, 5]. Согласно теории этого явления сущность микропроцессов в рабочем веществе лазера (мазера) состоит в том, что возбужденный атом этого вещества способен излучать фотон под действием другого фотона без его поглощения, если энергия последнего равняется разности энергий уровней атома (молекулы) до и после электромагнитного излучения им [1, 5]. При этом излученный возбужденным атомом (молекулой) фотон когерентен фотону, вызвавшему это излучение и является при этом фактически

его "точной копией". В результате такого кванто-механического процесса происходит усиление света (электромагнитных микроволн) внутри активного вещества лазера (мазера). Этим явление индуцированного излучения принципиально отличается от спонтанного электромагнитного излучения вещества, в котором излучаемые фотоны имеют случайные направления распространения, разную поляризацию и фазу. Поэтому излучение, возникающее в результате спонтанных энергетических переходов электронов в веществе, некогерентно. Оно распространяется по всевозможным направлениям и не дает энергетического вклада в проходящую через вещество узконаправленную электромагнитную волну. Чтобы проходящая через слой вещества электромагнитная волна усиливалась, нужно в нем искусственно создать условие, при котором в его возбужденных атомах массово появляются связанные электроны на более высоком энергетическом уровне, то есть надо создать инверсную населенность (заселенность) этих уровней атомов. Такая среда после этого будет являться термодинамически неравновесной. Физическая идея использования неравновесных сред для получения эффекта оптического усиления впервые была высказана известным российским ученым В.А. Фабрикантом (1907-1991 гг.) в 1939 году [1, 5]. Ниже рассмотрим вкратце процесс индуцированного электромагнитного излучения на примере работы твердотельного оптического квантового генератора, построенного на кристалле рубина. Известно, что рубин представляет собой кристалл корунда  $Al_2O_3$ , легированный небольшим количеством положительных ионов хрома  $Cr^{+3}$ , которые и являются источником лазерного излучения. Согласно [1, 5] для рубинового лазера характерна трёхуровневая энергетическая система накачки его рабочей среды, схематически приведенная на рис. 1.

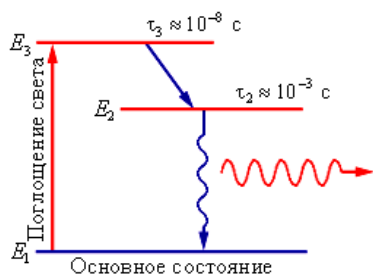


Рис. 1. Трёхуровневая энергетическая схема оптической накачки твердотельного рубинового лазера [5]

В рубине из-за влияния сильного электрического поля кристаллической решётки корунда  $Al_2O_3$  и соответственно проявления в нем известного эффекта Штарка (1913 год) [7] внешний энергетический уровень ионов хрома  $Cr^{+3}$  (уровень  $E_3$ ) будет расщеплён. Именно это обстоятельство делает возможным использование внешнего немонахроматического излучения в качестве оптической накачки рубина, схема которой и основные составные части рубинового лазера указаны на рис. 2. При вспышке импульсной лампы (см. рис. 2) ионы атома хрома  $Cr^{+3}$  переходят из своего основного состояния с наименьшей энергией  $E_1$  в возбуждённое состояние с большей энергией

$E_3$  (см. рис. 1). В этом энергетическом состоянии ион хрома  $Cr^{+3}$  может находиться недолго (до  $10^{-8}$  с). Поэтому почти сразу в нем происходит безизлучательный переход на меньший энергетический уровень  $E_2$ , на котором ион этого атома может находиться значительно дольше (до  $10^{-3}$  с). Уровень  $E_2$  в квантовой электронике принято называть метастабильным уровнем. Из-за существования этого энергетического уровня в кристалле рубина возникает возможность осуществления индуцированного излучения под воздействием его других случайных фотонов. Как только число таких ионов хрома  $Cr^{+3}$  в рубине, находящихся в метастабильном состоянии на энергетическом уровне  $E_2$ , становится больше, чем в их основном состоянии с наименьшей энергией  $E_1$ , в рубиновом лазере начинается процесс генерации узконаправленного электромагнитного (индуцированного) излучения [5].

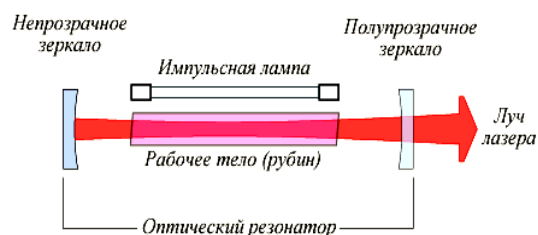


Рис. 2. Принципиальная схема оптической накачки и основные составные части твердотельного рубинового лазера [5]

Этот процесс генерации индуцированного излучения в рубиновом лазере обуславливается энергетическим (лазерным) переходом ионов хрома  $Cr^{+3}$  с метастабильного уровня  $E_2$  на основной уровень  $E_1$ . Для усиления вынужденного излучения в кристалле рубина используется открытый оптический резонатор с двумя зеркалами (одно близкое к идеальному – непрозрачное для света, а другое для отвода наружу излучения – полупрозрачное для света), в котором (см. рис. 2) из-за многократного отражения от указанных зеркал и прохождения по оптическому резонатору исходный пучок излучения вызывает в рубине многочисленные индуцированные (лазерные) переходы ионов хрома  $Cr^{+3}$  с уровня  $E_2$  на основной уровень  $E_1$  и соответственно появление в нем многочисленных фотонов. Из-за особого расположения в резонаторе зеркал в лазерном луче сохраняются лишь те фотоны, которые распространяются в направлении, параллельном оптической оси резонатора. Остальные фотоны быстро покидают объём резонатора и не участвуют в формировании лазерного луча. Укажем, что рассмотренный нами выше рубиновый лазер работает в импульсном режиме на длине основной волны в 694,3 нм, характерной для красного цвета [3, 7]. При этом рабочим элементом этого лазера является кристалл рубина цилиндрической формы диаметром около 10 мм и длиной до 100 мм. В кристаллической решетке рубина небольшая часть атомов алюминия Al (до 0,05 %) замещена атомами хрома Cr, концентрация которых в рубине составляет до  $1,6 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$  [7]. Импульсная мощность рубинового лазера достигает 1 МВт с  $1 \text{ см}^2$  торца его рабочего элемента-цилиндра [7]. Расходимость светового пучка в рубиновом лазере

ре не превышает  $0,5^\circ$ . Для сравнения этих количественных данных, присущих рубиновому лазеру, с характеристиками известных в природе источников света заметим, что мощность излучения поверхности Солнца с температурой около  $6000^\circ\text{C}$  в спектре его излучения на длине волны в  $500\text{ нм}$  составляет всего до  $0,1\text{ Вт}$  с одного  $\text{см}^2$  [7]. Одним из недостатков этого твердотельного лазера является то, что не менее  $50\%$  энергии его лампы-вспышки уходит на нагревание рабочего рубинового цилиндра. При температуре нагрева этого цилиндра около  $1000^\circ\text{C}$  рубиновый лазер перестает работать. В связи с этим данный лазер требует принудительного охлаждения его рабочего тела.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРОВ И МАЗЕРОВ

Все лазеры (мазеры) состоят из трёх основных составных частей: активной (рабочей) среды; системы накачки (источника энергии); оптического (микроволнового) резонатора, который может отсутствовать, если квантовый генератор работает в режиме усилителя. В настоящее время существует большое количество видов лазеров, использующих в качестве рабочей (активной) среды все агрегатные состояния вещества, включая плазму. В современной квантовой электронике различают следующие основные виды лазеров:

**1. Твердотельные лазеры** содержат люминесцирующие среды (диэлектрические кристаллы и стёкла) [7]. В качестве активаторов этих сред используются ионы редкоземельных элементов или ионы группы железа *Fe*. Накачка их рабочего тела – оптическая с применением мощных газоразрядных ламп-вспышек и осуществляется она обычно по трёх- или четырёхуровневой энергетической схеме. Современные твердотельные лазеры способны работать в импульсном, непрерывном и квазинепрерывном режимах [5]. Широкое применение в этой группе лазеров, кроме описанного выше рубинового с мощностью излучения до  $100\text{ Вт}$  в импульсе, получил неодимовый лазер, работающий по четырёхуровневой энергетической схеме на неодимовом стекле, активность и соответственно инверсная заселенность (населенность) которого создается ионами атома неодима  $\text{Nd}^{+3}$  [7]. Неодимовое рабочее тело этого лазера генерирует в непрерывном режиме инфракрасное излучение с длиной волны  $1,06\text{ мкм}$ . Одним из недостатков неодимового лазера является его низкий квантовый КПД, который определяется как отношение энергии излученного им фотона к энергии поглощенного фотона накачки. Отметим, что также по четырёхуровневой энергетической схеме работает твердотельный лазер на основе активного вещества из флюорита кальция *CaFr* с примесью положительных ионов диспрозия  $\text{Dy}^{+2}$  [7]. Такие твердотельные лазеры, работающие в непрерывном излучательном режиме, имеют мощность света в каждом из импульсов, следующих друг за другом с частотой до нескольких кГц, достигающую  $2\text{ МВт}$  [7]. Длина волны в световом пучке этого лазера равна  $2,36\text{ мкм}$  [7].

**2. Газовые лазеры**, получившие большое распространение, активной средой которых является смесь различных газов или паров [7]. Газы, как известно, характеризуются высокой оптической однородностью

и малой плотностью. Это позволяет в оптических резонаторах таких лазеров использовать сравнительно большие расстояния между их непрозрачными и полупрозрачными зеркалами. Поэтому они (эти лазеры) отличаются высокой мощностью излучения, монохроматичностью и узкой направленностью своего излучения. Работают газовые лазеры в непрерывном (рис. 3) и импульсном режимах. Метод оптической накачки для этих лазеров оказался практически непригоден из-за отсутствия полос поглощения в газах.



Рис. 3. Общий вид современного американского газового лазера из исследовательской лаборатории NASA, работающего в непрерывном режиме излучения голубого света [5]

Отметим, что оптическая накачка для них будет эффективной только в случае совпадения линий излучения лампы-вспышки с линиями поглощения рабочего газа в лазере. По настоящее время эту задачу удалось решить только для цезиевого газового лазера [1, 7]. В зависимости от системы накачки газовые лазеры разделяют на: газоразрядные лазеры; газовые лазеры с оптическим возбуждением; газовые лазеры с возбуждением заряженными элементарными частицами (например, лазеры с ядерной накачкой) [5]. Главным образом в рассматриваемом нами здесь виде лазеров для создания инверсной заселенности (населенности) энергетических уровней атомов рабочего газа (пара) используется метод возбуждения данных атомов электронными ударами [7]. При этом возбуждение электронных оболочек атомов газа осуществляется в процессе газового электрического разряда, приводящего к возникновению в рабочем теле лазера плазмы, состоящей из свободных электронов и ионов. Процесс передачи возбуждения и соответственно создания инверсной заселенности (населенности) в активном веществе такого вида лазера рассмотрим ниже вкратце на примере гелий-неонового лазера. Укажем, что первый в мире газовый гелий-неоновый лазер, излучающий в непрерывном режиме, был создан в декабре 1960 года американскими физиками (А. Джаван, У. Беннет, Д. Хэрриот) [1, 5]. Первоначально этот лазер работал в инфракрасном диапазоне, а затем он был модифицирован для излучения видимого красного света (рис. 4). На рис. 5 изображена схема построения гелий-неонового лазера. Общее давление в газовой смеси этого лазера составляет порядка  $102\text{ Па}$  при соотношении компонент гелия *He* и неона *Ne*, примерно равном  $10:1$ . Активным газом гелий-неонового лазера, на котором в непрерывном режиме возникает генерация на длине волны в  $632,8\text{ нм}$  (ярко-красный свет), является неон *Ne*. Гелий *He* в стеклянной кюве-

те 1 (см. рис. 5) выполняет роль буферного газа, участвуя в механизме создания инверсной населенности (заселенности) одного из верхних уровней неона  $Ne$ .

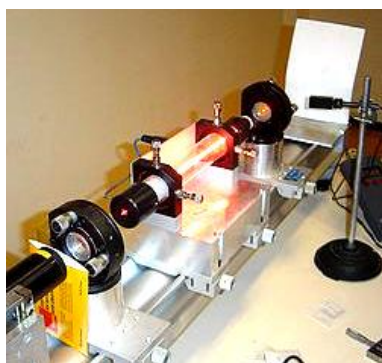


Рис. 4. Внешний вид газового гелий-неонового лазера, излучающего в непрерывном или импульсном режимах работы узконаправленный красный луч света [5]

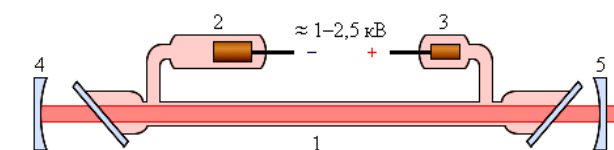


Рис. 5. Схема устройства газового гелий-неонового лазера (1 – стеклянная кювета со смесью гелия и неона, в которой создается высоковольтный разряд; 2 – катод; 3 – анод; 4 – сферическое глухое зеркало с пропусканием менее 0,1%; 5 – сферическое зеркало с пропусканием до 2 %) [5]

На рис. 6 представлена упрощенная схема энергетических уровней гелия  $He$  и неона  $Ne$  и физического механизма создания инверсной заселенности (населенности) лазерного перехода в гелий-неоновом лазере. При высоковольтном газовом электрическом разряде между электродами 2 и 3 в стеклянной кювете 1 этого лазера (см. рис. 5) вследствие образования в ней плазмы и последующих соударений с ее свободными электронами значительная часть атомов гелия  $He$  переходит в верхнее метастабильное состояние  $E_2$ .

В этом случае накачка лазерного перехода  $E_4 \rightarrow E_3$  в неоне  $Ne$  (см. рис. 6) осуществляется следующим образом. Возбужденные атомы гелия  $He$  неупруго сталкиваются с атомами неона  $Ne$ , находящимися в основном состоянии, и передают им свою энергию. Уровень  $E_4$  неона  $Ne$  расположен на 0,05 эВ выше метастабильного уровня  $E_2$  гелия  $He$ . Данный недостаток энергии компенсируется за счет кинетической энергии соударяющихся атомов. На уровне  $E_4$  неона  $Ne$  возникает инверсная населенность (заселенность) по отношению к его уровню  $E_3$ , который сильно обедняется за счет спонтанных переходов на ниже расположенные уровни (эти переходы на рис. 6 для неона  $Ne$  между уровнями  $E_3$ ,  $E_2$  и  $E_1$  показаны прямыми стрелками). При достаточно высоком уровне накачки в смеси гелия  $He$  и неона  $Ne$  начинается лавинообразный процесс размножения идентичных когерентных фотонов. Если стеклянная кювета 1 гелий-неонового лазера со смесью рассматриваемых газов помещена между высокоотражающими зеркалами 4 и 5 оптического резонатора (см. рис. 5), то в нем при усилении когерентных фотонов возникает лазерная генерация.

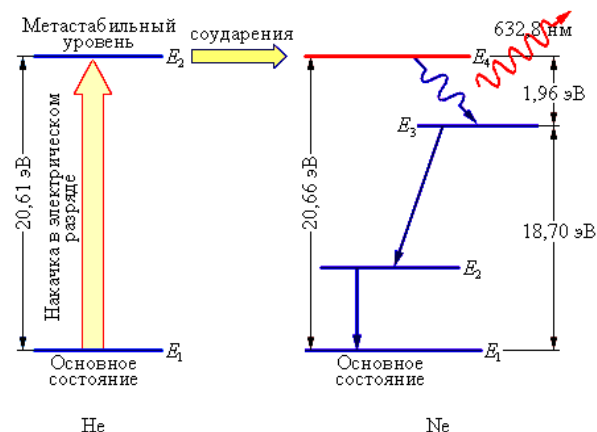


Рис. 6. Упрощенная схема создания инверсной заселенности (населенности) в газовом гелий-неоновом лазере [5]

Световое излучение  $He-Ne$  лазера обладает исключительной и непревзойденной монохроматичностью. Этот лазер может кроме красного цвета с длиной волны 632,8 нм генерировать и инфракрасное излучение с длинами волн 1150 и 3390 нм [7]. Импульсная мощность излучения гелий-неонового лазера на длине волны 1150 нм достигает до 15 МВт [5, 7].

В непрерывном режиме лазер на углекислом газе  $CO_2$  генерирует в инфракрасной области электромагнитное излучение мощностью до 10 кВт, а ионный аргоновый лазер на газе аргон  $Ar$  в видимой области – сверхвысокочастотное излучение мощностью до 1 кВт [7]. В импульсном режиме мощность этих газовых лазеров достигает нескольких сотен киловатт [7].

**3. Полупроводниковые лазеры.** Несмотря на то, что этот вид лазеров формально является твердотельным, он традиционно выделяется в отдельную группу. Вызвано это тем, что такие лазеры имеют иной механизм накачки (например, за счет инжекции избыточных носителей электрического заряда через  $p-n$  переход или гетеропереход, электрического пробоя в сильном поле или бомбардировки  $p-n$  перехода быстрыми электронами [5]), а квантовые переходы происходят между разрешенными энергетическими зонами, а не между дискретными уровнями энергии как у рубинового лазера. Отметим, что накачка полупроводниковых лазеров обычно происходит под действием пропускания через  $p-n$  переход их активного вещества сильного прямого электрического тока или воздействия на данный полупроводниковый переход пучка ускоренных электронов. Полупроводниковые лазеры – наиболее употребительный в быту вид лазеров [5]. На их основе работают практически все виды лазерных указок (рис. 7). В настоящее время китайская компания *Wicked Lasers* (г. Шанхай) осуществила настоящий технический прорыв в области создания лазерных указок серии *Spyder* [6]. Первичный источник света в этой лазерной указке – одноваттный инфракрасный лазерный диод с непрерывным излучением. Генерируемый этим диодом инфракрасный луч с длиной волны 808 нм проходит через линзу и попадает в кристалл из оксидов неодима  $Nd$ , иттрия  $Y$  и ванадия  $V$ , где преобразуется в ИК-излучение с длиной волны 1064 нм. Далее работает калий-титаново-фосфорный

кристалл, который преобразует это инфракрасное излучение в видимый лазерный луч с длиной волны 532 нм. Затем луч лазера проходит инфракрасный фильтр и выходную линзу и в итоге "меч Джедая" готов [6].

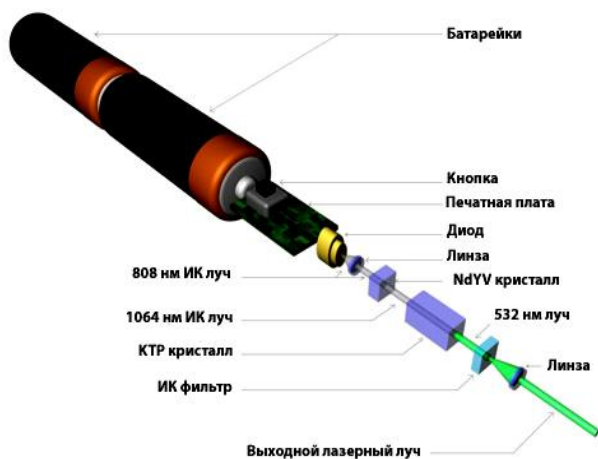


Рис. 7. Схема устройства мощной полупроводниковой лазерной указки с зеленым светом *Wicked Lasers Spyder* [6]

Этот карманный лазер вполне можно назвать "королём" лазерных указок. Кроме этого этот тип лазеров применяется в спектроскопии, в системах накачки других типов оптических квантовых генераторов, а также в медицине, телекоммуникации, голографии, лазерных принтерах (рис. 8) и лазерных целеуказателях (рис. 9) [5,6]. Укажем, что полупроводниковые алюминий-арсенид-галлиевые *AlGaAs* – лазеры, работающие на длине волны излучаемого света в 780 нм, используются в проигрывателях компакт-дисков и являются очень распространёнными в мире.



Рис. 8. Полупроводниковый лазер, широко применяемый в узле генерации изображения принтера *Hewlett-Packard* [6]



Рис. 9. Полупроводниковый лазерный целеуказатель [6]

В области военного применения этот тип лазеров в настоящее время широко используется в различных видах оружейных систем наведения (см. рис. 9) [6].

**4. Химические лазеры** являются одной из разновидностью газовых лазеров, источником энергии для которых служат химические реакции между компонентами их рабочей среды (смеси газов) [5]. Накачка химических лазеров происходит посредством протекания в их активном веществе химических реакций. При этом инверсия населённости (заселенности) возникает либо у продуктов этих реакций, либо у специально введённых в их активную среду примесей с подходящей структурой энергетических уровней. Лазерные переходы в этом случае происходят между возбуждёнными колебательно-вращательными и основными уровнями составных молекул продуктов химических реакций. Для осуществления химических реакций в активной среде таких лазеров необходимо постоянное присутствие свободных радикалов. Поэтому в них используются различные способы воздействия на молекулы активного вещества для их диссоциации. Отличаются широким спектром генерации в ближней инфракрасной области, большой мощностью непрерывного и импульсного излучения [5, 6]. Недавно огромный химический лазер (на кислороде *O* и йоде *I*), был построен корпорацией *Northrop Grumman* (США) [6]. Этот лазер излучает инфракрасный луч с длиной волны 1,315 мкм. Источником энергии в этом лазере является химическая реакция, протекающая в пламени синглетного кислорода и йода. Он способен работать в постоянном режиме в области мегаваттных мощностей. Область применения химических лазеров – научные исследования и лазерные вооружения [5, 6].

**5. Лазеры на красителях**, использующие в качестве активной среды жидкий раствор флюоресцирующих органических красителей с образованием широких спектров электромагнитного излучения [5]. Лазерные переходы в компонентах красителя осуществляются между их различными колебательными подуровнями первого возбуждённого и основного синглетных электронных состояний. Накачка в этом виде лазеров – оптическая. Длина волны их излучения – от 0,8 до 4 мкм. Они могут работать в непрерывном и импульсном режимах. Особенностью данных лазеров является возможность быстрой перестройки в них длины волны вынужденного электромагнитного излучения в широком диапазоне. Применяются главным образом в спектроскопических исследованиях и медицине [5].

**6. Эксимерные лазеры**, являющиеся разновидностью газовых лазеров и работающие на энергетических переходах эксимерных молекул (димерах благородных газов, а также их моногалогенидов), способных существовать лишь некоторое время в энергетически возбуждённом состоянии [5]. Энергетическая накачка в данном виде лазеров осуществляется пропусканием через их газовую смесь пучка электронов, под действием которых атомы (молекулы) их активной газовой среды переходят в возбуждённое состояние с образованием эксимеров, фактически представляющих собой среду с инверсной населённостью. Эксимерные лазеры отличаются высокими энергетическими характеристиками, малым разбросом длины волны генери-

руемого индукционного излучения и возможностью её плавной перестройки в широком диапазоне [5, 6].

**7. Лазеры на свободных электронах**, активной средой которых является поток свободных электронов, колеблющихся во внешнем электромагнитном поле и распространяющихся с релятивистской скоростью в направлении излучения [5]. Источником энергии излучения в них служит указанное мощное внешнее поле. Основной особенностью этого вида лазеров является возможность плавной широкодиапазонной перестройки в них частоты электромагнитной генерации. Различают убитроны и скаттроны, энергетическая накачка первых из которых осуществляется в пространственно-периодическом сильном электростатическом поле ондулятора, а вторых – за счет мощного высокочастотного поля электромагнитной волны. Каждый свободный электрон излучает до 108 фотонов [5]. Лазеры на свободных электронах с длиной волны, варьирующейся в диапазоне 0,085-6 нм, являются по сути классическими физическими приборами и их работа описывается законами классической электродинамики. Применяются при исследовании атмосферы, в материаловедении, медицине и в образцах вооружения систем противоракетной обороны (ПРО) [5].

**8. Квантовые каскадные лазеры**, являющиеся разновидностью полупроводниковых лазеров и которые излучают оптический луч в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах [5]. В отличие от обычных полупроводниковых лазеров, которые излучают электромагнитную энергию сверхвысокой частоты посредством вынужденных переходов между разрешенными электронными и дырочными уровнями, разделенными запрещенной зоной полупроводника, излучение в квантовых каскадных лазерах возникает при переходе электронов между слоями гетероструктуры полупроводника и состоит из двух типов лучей, причем вторичный луч обладает весьма необычными свойствами и не требует больших затрат энергии [5].

**9. Волоконные лазеры**, объемный резонатор которых построен на базе оптического легированного волокна, внутри которого полностью или частично генерируется вынужденное излучение [5]. При полностью волоконной реализации он называется цельноволоконным, а при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции этого типа лазера он называется волоконно-дискретным или гибридным. Сейчас выпускается волоконный лазер с легированием эрбием  $Er$  с длиной световой волны 1,56 мкм. Используется он в лазерных диодах, оптических усилителях в волоконно-оптических линиях связи, при обработке металлов (резка, сварка, гравировка), при термораскалывании стекла, в медицине и косметологии.

**10. Рентгеновские лазеры и гамма-лазеры**, представляющие собой новые виды мощных лазеров, развитие физических принципов функционирования которых на данный момент в области лазерной техники является приоритетной задачей научных исследований, направленных на создание лазерного оружия [5]. Сейчас известен псевдо-никелево-самариевый лазер, излучающий рентгеновское излучение с длиной волны в 17,3 нм [6]. В этом лазере индуцированное излучение происходит в сверхгорячей плазме самария  $Sm$ ,

создаваемое двойными импульсами лазера на неодимовом стекле. Данный лазер оказался первым демонстрационным лазером, работающим в области жесткого рентгеновского излучения [5,6]. Он может применяться в микроскопах сверхвысокого разрешения и голографии. Его сверхвысокочастотное направленное электромагнитное излучение лежит в "окне прозрачности" воды и поэтому он позволяет исследовать структуру ДНК, активность вирусов в клетках и действие лекарств на биологические объекты (человека).

Что касается мазеров, работающих в области радиочастот и применяемых в основном для усиления электромагнитных волн, то именно с них началось развитие в мире квантовой электроники, в которой на настоящее время принята следующая классификационная схема молекулярных квантовых генераторов:

**1. Аммиачный мазер.** Первый мазер на аммиаке  $NH_3$ , как известно из истории, был создан в 1954 году российскими физиками Н.Г. Басовым (1922-2001 гг.) и А.М. Прохоровым (1916-2002 гг.) и независимо от них американским физиком Ч. Таунсом (1915 г. рождения, рис. 10) [1, 5]. Эти ученые впервые использовали явление индуцированного испускания веществом электромагнитного излучения для создания микроволнового генератора радиоизлучения с длиной волны в 1,27 см [5, 6]. Для создания физической системы с инверсной заселенностью в этом виде мазера был использован метод сортировки молекул в различных энергетических состояниях с помощью сильного неоднородного электростатического поля, создаваемого в квадрупольном конденсаторе длиной около 100 мм, на электроды которого подается постоянное электрическое напряжение величиной до 30 кВ [3, 6, 7]. На вход между электродами этого конденсатора, размещенного в вакуумной камере с давлением порядка 1 мм рт.ст., подается практически термодинамически равновесный молекулярный пучок аммиака. При пролете через квадрупольный конденсатор мазера энергия возбужденных молекул аммиака в постоянном электрическом поле этого конденсатора будет увеличиваться, а невозбужденных – уменьшаться [5, 6]. Если электроды квадрупольного конденсатора мазера охладить жидким азотом, то невозбужденные молекулы аммиака будут к ним практически "примерзать", а возбужденные – свободно пролетать через данный конденсатор, фокусируясь в узкий направленный пучок вдоль его продольной оси. Поэтому после сортирующей электрической системы (квадрупольного конденсатора) этого мазера формируется аммиачный пучок с интенсивностью около 10<sup>13</sup> молекул в секунду, в котором содержатся только возбужденные молекулы аммиака  $NH_3$ . Благодаря этому приему сортировки и дополнительного возбуждения молекул активной среды мазера осуществляется квантовый переход между дискретными энергетическими уровнями в молекулах аммиака  $NH_3$ . Отметим, что в этом мазере высокочастотная мощность индуцированного излучения молекулярной рабочей среды, выделяющаяся в его объемном резонаторе, отводится к ее потребителю с помощью волновода. Этот вид газового мазера отличается высокой стабильностью своего вынужденного когерентного электромагнитного излучения. Так, молекулярные часы, построенные по физическому принципу работы рас-

смагриваемого нами аммиачного мазера, имеют погрешность временного хода, составляющую до 1 с на 1000 лет их функционирования [6].

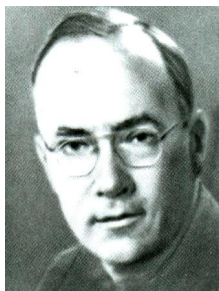


Рис. 10. Выдающийся американский физик Чарлз Таунс (1915 г.р.), явившийся одним из основателей квантовой электроники

**2. Водородный мазер**, обладающий бóльшей монохроматичностью индуцированного излучения возбужденных атомов водорода  $H$  чем мазер на молекулах аммиака  $NH_3$  [6]. Его устройство во многом аналогично устройству мазера, работающему на молекулах аммиака  $NH_3$ . Отметим, что этот мазер содержит высокодобротный объемный резонатор с резонансной частотой, настроенной на частоту электромагнитного излучения, испускаемого возбужденными атомами водорода при их переходе в основное энергетическое состояние. Чем выше добротность и соответственно качество этого резонатора, тем дольше не будут затухать электромагнитные колебания, возбужденные в резонаторе мазера на частоте резонанса. При превышении потоком возбужденных атомов (молекул), влетающих в объемный резонатор мазера, некоторой критической величины электромагнитное излучение, возникающее в результате вынужденного испускания, начинает накапливаться в резонаторе. Этот процесс тем самым будет со временем все более усиливать вынужденное испускание возбужденными атомами (молекулами) соответствующих фотонов. Длина волны вынужденного излучения водородного мазера составляет величину в 21 см [6]. Основным недостатком водородного мазера является его малая мощность излучения, которая в тысячи раз меньше мощности аммиачного мазера. Водородный мазер чаще всего используется как генератор стандартной радиочастоты.

**3. Твердотельные мазеры**, которые применяются чаще всего в качестве усилителей электромагнитного излучения в сантиметровом диапазоне длин волн. Активная среда в этих мазерах представляет собой кристалл (наибольшее распространение получили твердотельные мазеры на кристаллах рубина), размещенный в объемном резонаторе, имеющем две резонансные частоты: одну в качестве частоты излучения энергетической накачки активного вещества и другую в качестве частоты усиления для индукционного излучения его активной среды [6]. Инверсная населенность (заселенность) энергетических уровней в кристалле данного мазера достигается в результате поглощения кристаллом электромагнитного излучения накачки, длина волны которого меньше длины волны усиления. Главной особенностью твердотельных мазеров, называемых еще парамагнитными квантовыми усилителями, является то, что инверсная населенность в их активном веществе (кристалле) осуществ-

ляется на его искусственно расщепленных энергетических уровнях, создаваемых путем помещения этого вещества (кристалла) вместе с объемным резонатором в сильное постоянное магнитное поле [6]. Величина расстройки между расщепленными энергетическими уровнями в указанном активном веществе (кристалле) полностью определяется величиной напряженности внешнего сильного постоянного магнитного поля. Как правило, парамагнитные усилители используют в диапазоне длин электромагнитных волн от 1 до 100 см [5, 6]. Важнейшее свойство парамагнитных квантовых усилителей (твердотельных мазеров) – чрезвычайно низкий уровень шума в их полезном электромагнитном сигнале, который примерно в 100 раз меньше, чем в лучших усилителях, работающих на других физических принципах [6]. Наиболее широко парамагнитные усилители применяют в радиоастрономии и радиолокации для усиления слабых радиосигналов, приходящих из далекого космоса на Землю.

В заключение этого раздела укажем, что сейчас существуют мазеры с использованием циклотронного резонанса и строботроны, основанные на тормозном излучении электронов, а также флимастроны, использующие эффект черенковского и переходного излучений [1, 6]. Заметим, что в газовых мазерах сортировка энергетически не- и возбужденных молекул его активного вещества может осуществляться и с помощью сильного неоднородного магнитного поля [7].

### 3. НЕКОТОРЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ РОССИЙСКИХ ФИЗИКОВ В СОЗДАНИИ ЛАЗЕРОВ И МАЗЕРОВ

С 50-х годов прошедшего 20-го столетия ведущим научным центром бывшего СССР в области квантовой электроники стал Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) [8]. Здесь многие десятилетия плодотворно трудились выдающиеся российские физики Басов Николай Геннадиевич (рис. 11) и Прохоров Александр Михайлович (рис. 12), ставшие академиками АН СССР и одними из основоположников квантовой электроники [1,8]. Именно здесь в 1954 году Басов Н.Г. совместно с Прохоровым А.М. и независимо от выдающегося американского физика Таунса Ч. (см. рис. 10) создали первый в мире микроволновый квантовый генератор индуцированного излучения – мазер на пучке молекул аммиака  $NH_3$  [1,6,8]. В 1955 году Басовым Н.Г. был предложен трехуровневый метод создания неравновесных квантовых систем (см. рис. 1), широко используемый и по сей день в квантовых генераторах и усилителях мощности радио- и оптического частотных диапазонов.



Рис. 11. Выдающийся российский физик, академик АН СССР Николай Геннадиевич Басов (1922-2001 гг.)

Этими работами указанных советских физиков было положено начало активному развитию в мире квантовой электроники. Поэтому недаром в 1964 году российским физикам Басову Н.Г. и Прохорову А.М. и американскому физика Таунсу Ч. за фундаментальные исследования по созданию генераторов и усилителей нового квантового типа (мазеров и лазеров) была присуждена Нобелевская премия по физике [1, 5].



Рис. 12. Выдающийся российский физик, академик АН СССР Александр Михайлович Прохоров (1916-2002 гг.)

Кроме того, Басовым Н.Г. была выдвинута идея по использованию в лазерах полупроводников и созданию на их основе твердотельных полупроводниковых лазеров (см. раздел 2). В 1961 г. он также предложил для возможного решения вопросов термоядерного синтеза использовать мощные лазеры, что привело к созданию принципиально нового и признанного в мире метода лазерного микротермоядерного синтеза. Им был проведен цикл работ по созданию мощных химических квантовых оптических генераторов, внешний вид одного из которых приведен на рис. 13 [8]. Данный высокоэффективный химический лазер (см. раздел 2) был создан в СССР на принципиально новом методе приготовления активной среды оптического квантового генератора [8]. Удельные характеристики этого кислородно-йодного лазера ФИАН оказались такими, которые долгое время определяли мировой уровень в области разработки химических лазеров. При этом его создателям удалось достигнуть рекордных значений химической эффективности малогабаритных лазеров этого вида за счет использования принципиально новых генераторов синглетного кислорода струйного типа с интенсифицированным массообменом в реакционной зоне этого лазера. Отметим, что в настоящее время согласно [8] струйный генератор синглетного кислорода, созданный в российском ФИАН, применяется практически во всех научных лабораториях мира, где разрабатываются и исследуются химические кислородно-йодные лазеры.

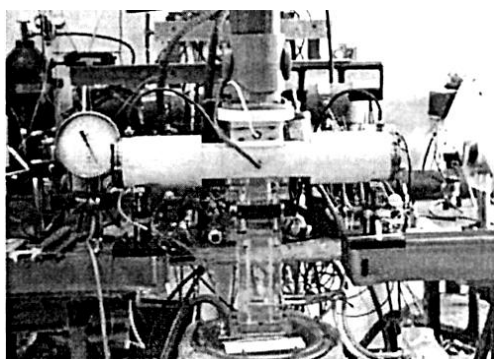


Рис. 13. Химический кислородно-йодный лазер ФИАН [8]

Важной страницей в истории лазерных исследований в российском ФИАН в период 1963-1969 гг. является создание в лаборатории квантовой радиофизики этого всемирно известного института под научным руководством академика Басова Н.Г. больших йодных фотодиссоционных лазеров (рис. 14) с накачкой их газовой рабочей среды излучением взрывной ударной волны или открытого сильноточного электрического разряда [1, 8]. Учеными ФИАН при этом было показано, что наиболее эффективным режимом работы таких мощных лазеров является тот, при котором скорость расширения среды от воздействующей на нее импульсной нагрузки (от взрыва или разряда) превышает скорость волны фотодиссоциации [8]. Разработка и создание мощного фотодиссоционного лазера стала исключительно российским достижением, не имевшим как тогда, так и сейчас зарубежных аналогов. Наличие в бывшем СССР такого сверхмощного взрывного газового фотодиссоционного лазера (при его длине в 30 м энергия в выходном импульсе светового излучения достигала 1 МДж) позволило отечественным ученым и инженерам определить реальные результаты взаимодействия в атмосферном воздухе концентрированного лазерного излучения с различными твердыми веществами в широких пучках света и при больших площадях их воздействия на испытываемые материалы разных технических объектов [8].

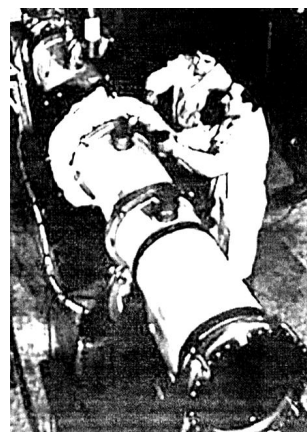


Рис. 14. Мощный фотодиссоционный лазер ФИАН с открытым электрическим искровым разрядом и энергией узконаправленного светового импульса 1,8 кДж при его длительности 30 мкс (средняя импульсная мощность – 60-МВт) [8]

Созданный в ФИАН газовый фотодиссоционный лазер отличался своей высокой эффективностью: практически каждый поглощенный его активной средой фотон накачки затем в процессе индуцированного излучения ею потока света излучался этим лазером. Отметим то немаловажное обстоятельство, что разработка газового фотодиссоционного лазера (с накачкой взрывом химического ВВ [9] или искровым сильноточным разрядом [10]) в ФИАН была выполнена тогда, когда в мире иных мощных лазеров, кроме твердотельных рубинового и неодимового, еще не существовало [8]. Интересным фактом является то, что в этом типе мощного газового лазера длина искрового сильноточного разряда составляла не менее 1 м, а его



диаметр – до 12 см. Известные нынче мощные импульсные лазеры (например, химический  $HF$ - лазер и газовый углекислотный  $TEA$ - лазер, а также  $CO_2$ - лазер с преионизацией и эксимерный  $KrF$ - лазер [8]) появились в мире после 1970 г. Здесь следует отметить также то, что академик Прохоров А.М. в период 1955-1960 гг. активно работал в ФИАН над созданием квантовых парамагнитных усилителей СВЧ диапазона [1, 8]. Для этой цели им были проведены детальные исследования многих кристаллов, что дало возможность рекомендовать рубин для дальнейшего использования в лазерах. В 1958 г. он предложил новый тип объемного резонатора для субмиллиметровых волн – открытый резонатор в виде параллельных зеркальных плоскостей. Данный тип резонатора получил широкое применение во всем мире в лазерной технике [1, 5]. В 1963 г. он с сотрудниками ФИАН разработал новый принцип действия лазера с использованием двухквантовых переходов в его активной среде. В 1966 г. им был создан новый тип мощного газового лазера (см. раздел 2) – газодинамический лазер, работающий на тепловой накачке, инверсия населенностей (заселенностей) в активной среде которого создавалась между возбужденными колебательно-вращательными уровнями гетероядерных молекул этой среды путём адиабатического расширения движущейся в нем с высокой скоростью газовой смеси (например, углекислого газа  $CO_2$  с примесью молекул азота  $N_2$  и гелия  $He$ ) [5]. Результаты его плодотворных исследований по высокотемпературной плазме способствовали активному развитию в СССР и ряде мировых научных центров нового направления в получении энергии – лазерного термоядерного синтеза [1]. В последние годы "пальма" научного первенства в России в области разработки и создания мощных лазеров (мазеров) перешла к Институту прикладной физики РАН (г. Москва) и всемирно известному российскому ядерному центру – Всероссийскому научно-исследовательскому институту экспериментальной физики (ВНИИЭФ, г. Саров, Горьковской обл.) [6, 13].

#### 4. КРУПНЕЙШИЕ ЛАЗЕРЫ И МАЗЕРЫ МИРА

Мазеры открыли на нашей планете эру квантовой электроники. На физических принципах этих молекулярных квантовых генераторов были созданы вскоре и квантовые генераторы света – лазеры. Приведем ниже краткий перечень крупных лазеров (мазеров) современных научных лабораторий мира с импульсной мощностью луча выше 100 ТВт. Среди них укажем следующие квантовые генераторы [6, 11, 12]:

1. "**Nova**", Ливерморская национальная лаборатория (США), 1996 год создания, импульсная мощность – 1500 ТВт, энергия в импульсе – 660 Дж.
2. "**Техасский петаваттный лазер**", Техасский университет (США), 2008 год создания, импульсная мощность – 1100 ТВт, энергия в импульсе – 186 Дж.
3. "**Фемта-Луч**", ВНИИЭФ (Россия), 2009 год создания, импульсная мощность – 1000 ТВт, энергия в импульсе – 70 Дж.
4. "**Vulcan**", Резерфордская лаборатория (Великобритания), 2004 год создания, импульсная мощность – 1000 ТВт, энергия в импульсе – 700 Дж.

5. "**PEARL**", Институт прикладной физики РАН (Россия), 2007 год создания, импульсная мощность – 560 ТВт, энергия в импульсе – 24 Дж.
6. "**Titan laser**", Ливерморская национальная лаборатория (США), 2006 год создания, импульсная мощность – 500 ТВт, энергия в импульсе – 200 Дж.
7. "**Trident laser**", Лос-Аламосская национальная лаборатория (США), 2007 год создания, импульсная мощность – 200 ТВт, энергия в импульсе – 100 Дж.
8. "**OMEGA EP**", Рочестерский университет (США), 2008 год создания, импульсная мощность – 260 ТВт, энергия в импульсе – 2600 Дж.
9. "**Петаваттный модуль для ГЕККО XII**", Осакий университет (Япония), 2004 год создания, импульсная мощность – 900 ТВт, энергия в импульсе – 420 Дж.
10. "**Кванджу**", Институт науки и техники (г. Кванджу, Южная Корея), 2010 год создания, импульсная мощность – 1000 ТВт, энергия в импульсе – 34 Дж.

Из указанных выше квантовых генераторов света работа восьми основана на применении технологии усиления chirпованных импульсов (СРА) с использованием неодимового стекла и титан-сапфира и только два российских лазера ("**PEARL**" и "**Фемта-Луч**") базируются на оптическом параметрическом усилении (ОРСПА) в нелинейных кристаллах  $DKDP$  [5, 6].

#### 5. НЕКОТОРЫЕ ИЗВЕСТНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ И МАЗЕРОВ

##### 1. Применение в промышленных технологиях.

Одним из практических направлений в технологии машиностроительного производства, в котором широко используются лазерные установки, является **поверхностная лазерная обработка металлов**. Здесь можно выделить [5, 6]: а) **лазерную закалку** (термоупрочнение), в которой высокая скорость охлаждения нагретых лазерным лучом участков металла приводит к образованию в нем закалочных структур, характерных только для лазерной обработки; б) **лазерный отжиг** для получения более равновесной структуры (по сравнению с исходным состоянием), обладающей большей пластичностью и меньшей твердостью металла (сплава); в) **лазерный отпуск**, применяемый при необходимости локального увеличения пластичности или ударной вязкости металла, например, в местах соединения различных деталей; г) **лазерное оплавление**, обеспечивающее аморфизацию поверхности металла (сплава) в условиях ее скоростного облучения лучом лазера и которое приводит к повышению твердости, коррозионной стойкости, улучшенным магнитным характеристикам и другим специфическим свойствам материала. Другим важным направлением в технологическом применении лазеров является **получение поверхностных покрытий**, где следует обозначить [5, 6]: д) **лазерное легирование сталей**, значительно повышающее микротвердость и стабильность структуры металлической поверхности и которое может во много раз уменьшить интенсивность ее износа; ж) **лазерную наплавку**, являющуюся уникальным методом нанесения износостойких поверхностных слоев на металл (сплав) без его поволодок и короблений; з) **вакуумно-лазерное напыление**,

закрывающееся в испарении материала участка поверхности под воздействием лазерного излучения в вакууме и конденсировании испарившихся продуктов на той или иной подложке и обеспечивающее получение поверхностного слоя с химическим составом, отличным от основного металла; и) **ударное воздействие лазерного излучения**, которое может использоваться для упрочнения поверхности и для инициирования физико-химических процессов при формировании, например, *p-n* – переходов в полупроводниковых материалах; к) **лазерную сварку**, являющуюся сейчас наиболее перспективной технологией для промышленного использования в связи с разработкой мощных лазеров с непрерывным и импульсно-периодическим действием (при этом виде сварки шов получается узким и глубоким, который принципиально отличается от сварных швов, получаемых при использовании традиционной технологии электросварки; лазерная сварка с глубоким проплавлением позволяет сваривать толстые слои материалов с большой скоростью при минимальном тепловом воздействии на материал, прилегающий к зоне расплава, что улучшает свойства сварного шва и качество сварного соединения). Другим направлением технологического использования в промышленности лазеров является **лазерное разделение материалов**, где следует выделить [5, 6]: л) **лазерную резку**, позволяющую разрезать практически любые материалы независимо от их теплофизических свойств (лазерная резка отличается минимальным механическим воздействием на обрабатываемый материал; при этом виде резки возникают минимальные деформации как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания разрезаемого материала); м) **газолазерную резку**, когда в зону реза подают луч лазера и технологический газ в виде кольцевой или отдельных сверхзвуковых расчетных струй (газолазерная резка эффективна не только для раскроя хрупких, мягких и нетеплостойких материалов (например, стекла, резины, ткани); она обеспечивает обработку и самых твердых и тугоплавких материалов, поддающихся только алмазному инструменту); н) **термораскалывание**, характеризующееся неоднородностью нагрева стекла с помощью лазерного луча, охлаждаемого струей инертного газа; о) **скрайбирование**, применяемое в электронной промышленности для лазерной обработки пластин из кремния, арсенида галлия и других материалов с нанесенными полупроводниковыми структурами с целью последующего разделения этих пластин толщиной 150-300 мкм на отдельные элементы по линии надреза (при скорости скрайбирования до 250 мм/с с глубиной риски до 100 мкм и ее шириной до 40 мкм лазерное скрайбирование по сравнению с обычным скрайбированием алмазным резцом обеспечивает большую точность разделения тонких полупроводниковых пластин и способствует повышению выхода годных изделий). Еще одним технологическим применением лазеров в промышленности является **лазерная размерная обработка**, где можно указать [5, 6]: п) **лазерную маркировку и гравировку**, применяемую практически во многих отраслях производства для идентификационного и защитного кодирования образцов промыш-

ленных товаров, нанесения надписей на приборные панели, измерительный инструмент, клавиатурные поля, а также для изготовления табличек и шильдиков; р) **лазерную обработку отверстий**, отличающуюся высокоточной обработкой в тугоплавких материалах отверстий малого диаметра (в десятки мкм).

**2. Применение в быту**, включающее широкое использование лазеров в следующих устройствах [5]: с) **проигрывателях компакт-дисков и DVD** бытовой электронной техники; т) **лазерных принтерах** компьютеров (см. рис. 8); у) **считывателях штрих-кодов** на промышленных товарах; ф) **лазерных указках** (рис. 15), являющихся портативными генераторами когерентных и монохроматических электромагнитных волн видимого диапазона в виде узконаправленного луча и использующихся в образовательных учреждениях, на научных и бизнес презентациях вместо обычных указок (с синим цветом луча длиной 445 нм, зеленым цветом луча длиной 532 нм, желтым цветом луча длиной 593,5 нм и красным цветом луча длиной 635 нм; сейчас красные лазерные указки являются самым распространенным типом указок; в этих указках, запитываемых от батареек-таблеток, используется обычный лазерный диод красного цвета с линзой и небольшая электроплата для управления питанием);



Рис. 15. Миниатюрные лазерные указки с различными цветами испускаемого светового луча (сверху вниз – указки соответственно синего, зеленого и красного цветов) [5]

х) в аппаратуре для **добавления субтитров** на киноэкранах; ц) при **лазерных световых шоу** (рис. 16).



Рис. 16. Демонстрация современного лазерного сопровождения музыкальных представлений (лазерное шоу) [5]

**3. Применение в медицине.** С появлением лазеров практически наступила новая эра в хирургии. Самым популярным лазером в хирургии стал газовый углекислотный лазер (см. раздел 2). Сегодня в области хирургии лазеры используются при выполнении [5, 6]: желудочно-кишечных операций, операций на желчных путях, селезенке, печени и легких, соединении мышечной ткани и сваривании костей. Незаменимым бескровным скальпелем стал лазер в гинекологии, урологии и лапароскопии, при удалении опухолей на головном и спинном мозге. Отметим, что разработчикам хирургических лазеров приходится сталкиваться с серьезными вопросами при их исполь-

зовании, так как живые ткани содержат много жидкой крови и лимфы, которые сильно поглощают энергию их луча и препятствуют выполнению требуемой медицинской операции. С помощью лазеров сейчас осуществляется восстановление (за счет приваривания лазером отслоившейся сетчатки глаза) и коррекция (за счет лазерной обработки хрусталика глаза) зрения. Лазеры нашли широкое применение в косметической хирургии (лазерная эпиляция, лечение сосудистых и пигментных дефектов кожи, лазерный пилинг, удаление татуировок и пигментных пятен) и стоматологии, а также при диагностике заболеваний.

**4. Применение в военном деле.** Одними из военных применений лазеров является их использование в следующих образцах и системах вооружения [5,6]: ч) **лазерных дальномерах**, состоящих из импульсного лазера и детектора излучения (измерение времени, за которое луч лазера преодолевает путь до отражателя и обратно, при известном значении скорости света в воздухе (вакууме) позволяет определить с высокой точностью расстояние между лазером и отражающим объектом; найденное значение расстояния до цели может быть использовано для наведения на нее оружия, например, танковой пушки); ш) **оружейных системах лазерного наведения (целеуказания)**, представляющих собой лазер небольшой мощности (см. рис. 9), "подсвечивающий" в непрерывном режиме работы цель для боеприпасов с лазерным наведением – "умных" бомб или ракет, запускаемых с самолёта (лазерный излучатель при этом может находиться как на самом самолёте, так и на земле; в устройствах лазерного наведения обычно используются инфракрасные лазеры); щ) **лазерных прицелах**, содержащих небольшой лазер (рис. 17), работающий в видимом диапазоне (обычно красного цвета) и прикрепленный к стволу пистолета (винтовки) так, чтобы его луч был параллелен оружейному стволу (из-за слабой расходимости лазерного луча, даже на больших расстояниях, этот прицел даёт маленькое пятнышко на цели, на которое стрелок направляет свой ствол и соответственно выстрел); ь) **системах обнаружения снайперов**, основанных на отражении направленного луча лазера от светочувствительных объектов противника (например, от элементов их снайперских винтовок);



Рис. 17. Револьвер, оснащенный лазерным прицелом [6]

ы) **системах постановки помех снайперам**, базирующихся на организации помех путем "сканирования" лазерным лучом местности и не позволяющих вражеским снайперам вести прицельную стрельбу или наблюдение в оптические приборы; ь) **будущих системах лазерного стрелкового оружия**, обладающих узким световым импульсом с энергией не менее

1,6 кДж (эта энергия луча импульсного лазера будет эквивалентна действию на цель летящей пули Ø9 мм; в этом случае лучевой импульс лазера продолжительностью в 1 с должен иметь мощность 1,6 кВт, что при низком КПД лазера приводит к полной энергии, запасаемой за счет накачки в активном веществе лазера, в лучшем случае порядка 16 кДж) [6]. Вес такой переносной системы лазерного оружия будет определяться большой массой источника энергии для его энергетической накачки. Поэтому нетранспортабельность и тяжелые режимы быстрого отвода тепла от активной среды лазера после испускания им мощного луча делают подобные стрелковые системы на сегодня не реальными для боевого применения. В последние годы министерство обороны США успешно провело первое испытание **сверхмощного боевого лазера** (рис. 18), который должен стать частью нового военного комплекса в американской системе ПРО [6]. По оценкам создателей новой системы ПРО этот лазер сможет уничтожить баллистические ракеты с расстояния в несколько километров. После доработки этого вида лазерного оружия его предполагают установить на модифицированный *Boeing-747-400F* и далее провести натурное испытание такого лазера в воздухе для демонстрации принципиальной возможности перехвата баллистической ракеты противника данным способом ещё на восходящей ветви ее траектории [6].



Рис. 18. Демонстрация в околоземном воздушном пространстве первого светового залпа гигантского боевого лазера США, установленного на самолете *Boeing 747* [6]

**5. Применение в научных исследованиях.** Здесь следует указать использование лазеров в следующих научно-технических областях [5, 6]: э) при **спектроскопическом исследовании вещества**, где необходимы как непрерывное электромагнитное излучение с чрезвычайно узким и стабильным частотным спектром, так и ультракороткие импульсы светового излучения длительностью вплоть до сотен аттосекунд ( $1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$  [7]); ю) при **измерении расстояния до небесных тел**, основанном на прохождении сфокусированного лазерного луча от поверхности Земли до этих тел и точном измерении времени, затраченном им на путь до их поверхности и обратное возвращение к Земле; я) при **создании искусственных опорных звезд**, используемых для повышения качества изображения астрономических объектов путем измерения и компенсации оптических искажений земной атмосферы; д) в **фотохимии**, где используются сверхкороткие световые импульсы длительностью порядка единиц фемтосекунд ( $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$  [7]) для запуска и анализа химических реакций; ф) при **лазерном намаг-**

**ничивании тел**, использующем сверхкороткие интенсивные световые импульсы для сверхбыстрого управления магнитным состоянием вещества (в этом интенсивно развивающемся сейчас научном направлении открыто множество новых оптико-магнитных явлений, таких как: сверхбыстрое размагничивание физических тел за время около 200 фс, тепловое перемагничивание тел светом и нетепловое оптическое управление их намагниченностью с помощью поляризации света); г) при **лазерном охлаждении вещества**, где за счет сканирующих лучей лазеров осуществляется непосредственное охлаждение до сверхнизких температур его атомов и молекул; ж) при изучении **термоядерного синтеза** ядер легких атомов вещества.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
2. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
4. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
5. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Лазер>.
6. <http://www.membrana.ru/particle/7838>.
7. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
8. Зуев В.С. Из истории лазерной физики 60-х годов в КРФ ФИАН. Фотодиссоционный лазер // История науки и техники. – 2009. – № 4. – С. 69-73.
9. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 4: Изобретение химических взрывчатых веществ // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 3-9.
10. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 6: Техника высоких напряжений // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – № 1. – С. 3-15.
11. Хазанов Е.А., Сергеев А.М. Петаваттные лазеры на основе оптических параметрических усилителей: состояние и перспективы // Успехи физических наук. – 2008. – Том 178. – С. 1006.
12. Коржиманов А.В., Гonosков А.А., Хазанов Е.А., Сергеев А.М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов // Успехи физических наук. – 2011. – Том 181. – С. 9-32.
13. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 7: Создание ядерного и термоядерного оружия // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 3-15.

**Bibliography (transliterated):** 1. Hramov Yu.A. Istoriya fiziki. – Kiev: Feniks, 2006. – 1176 s. 2. Kudryavcev P.S. Kurs istorii fiziki. – M.: Prosveshchenie, 1974. – 312 s. 3. Baranov M.I. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1: `Elektrofizika i vydayushchiesya fiziki mira. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2008. – 252 s. 4. Bol'shoj illyustrirovannyj slovar' inostrannyh slov. – M.: Russkie slovni, 2004. – 957 s. 5. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Lazer>. 6. <http://www.membrana.ru/particle/7838>. 7. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 8. Zuev V.S. Iz istorii lazernoj fiziki 60-h godov v KRF FIAN. Fotodissocionnyj lazer // Istoriya nauki i tehniki. – 2009. – № 4. – S. 69-73. 9. Baranov M.I. Antologiya vydayushchisya dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 4: Izobretenie himicheskikh vzryvchatyh veschestv // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2011. – № 5. – S. 3-9. 10. Baranov M.I. Antologiya vydayushchisya dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 6: Tehnika vysokih napryazhenij // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2012. – № 1. – S. 3-15. 11. Hazanov E.A., Sergeev A.M. Petavattnye lazery na osnove opticheskikh parametricheskikh usilitelej: sostoyanie i perspektivy // Uspehi fizicheskikh nauk. – 2008. – Tom 178. – S. 1006. 12. Korzhimanov A.V., Gonoskov A.A., Hazanov E.A., Sergeev A.M. Gorizonty petavattnyh lazernyh kompleksov // Uspehi fizicheskikh nauk. – 2011. – Tom 181. – S. 9-32. 13. Baranov M.I. Antologiya vydayushchisya dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 7: Sozdanie yadernogo i termoyadernogo oruzhiya // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2012. – № 2. – S. 3-15.

*Поступила 31.05.2011*

*Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния"  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
тел. (057) 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua*

*Baranov M.I.*

#### **An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 9: Creation of masers.**

A brief scientific and historical essay on the history of creation of masers and maser amplifiers widely applied in various fields of science and technology is given.

**Key words – essay, history, masers, maser amplifiers, creation.**