

УДК 621.373.8:623.094

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

© 2023 г. И. А. Зайцев<sup>1,\*</sup>, С. Н. Горбачёва<sup>1</sup>, А. В. Масалимов<sup>1</sup>, А. В. Акимов<sup>1</sup>,  
А. В. Горбачёв<sup>1</sup>, И. А. Тюрин<sup>2</sup>, В. В. Куликова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*E-mail: era\_otd2@mil.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 05.10.2023 г.

Представлена краткая история развития лазеров от возникновения квантовой теории до современных образцов. Рассмотрены основные физические принципы функционирования лазеров, дана классификация по используемой активной среде. Выделены основные области применения лазеров, такие как металлообработка, медицина, информационные технологии. Отдельно отмечены военное применение лазеров и перспективы их применения в данном направлении.

DOI: 10.56304/S2782375X2302016X

### ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. История развития лазерных технологий
  2. Физические принципы работы лазера
  3. Виды лазеров
  4. Применение лазеров
  5. Возможность применения в военной сфере
  6. Перспективы развития лазерных технологий
- Заключение

### ВВЕДЕНИЕ

Лазер – источник электромагнитного (оптического) излучения, формируемого путем вынужденного излучения микрочастиц вещества. Термин “лазер” происходит от аббревиатуры LASER, составленной из начальных букв английских слов фразы “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, означающей в переводе “усиление света в результате вынужденного излучения”.

В современной науке, технике, медицине, биологии и других областях человеческой деятельности лазеры находят широчайшее применение. Быстрая и эффективная интеграция лазерных устройств во многие сферы жизни произвела из-за уникальной возможности лучевых технологий получать качественные и экономически выгодные изделия, недостижимые другими техническими средствами, а также прецизионные измерительные устройства.

Лазерные технологии продолжают совершенствоваться, и вместе с ними расширяется спектр

услуг на мировом рынке. Открываются еще большие возможности изучения физического мира (телескопические системы, лазерный термоядерный синтез, просвечивающие поляритонные лазеры, фемтосекундные лазеры, терагерцовые лазеры), улучшения жизни и продуктивной повседневной деятельности человека (фотодинамическая терапия в лечении опухолей, гибкие лазеры в нанопотонных технологиях, вычислительные основы квантовых компьютеров и др.).

### 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Точкой отсчета лазерной технологии считается введение понятия кванта – минимальной порции излучения. Идея Макса Планка о том, что излучение производится не непрерывным потоком, а порциями и введенная им “постоянная действия”, положили начало целому разделу современной физики – квантовой механике.

Эти идеи были развиты Альбертом Эйнштейном, который в 1904 г. описал квант электромагнитного излучения – фотон – как элементарную частицу светового потока и применил его для обоснования известных зависимостей фотоэффекта. В течение последующих 20 лет им совместно с Эрвином Шрёдингером, Луи де Бройлем, Максом Борном и Эрнстом Резерфордом были заложены основные принципы квантовой механики.

К 1927 г. Эйнштейном была разработана теория вынужденного когерентного излучения, по сути описавшая принципы управляемого элект-

ромагнитного излучателя, который и был в дальнейшем назван лазером. Он показал существование вынужденного излучения, выделил его из общих принципов квантовой механики и термодинамики и доказал, что оно когерентно вынуждающему излучению (т.е. имеет с ним одинаковое направление, длину волны, фазу и поляризацию) [1–3].

Однако получаемое на практике вынужденное излучение еще долгое время было очень слабо различимым на фоне спонтанного излучения. Для реализации лазерной технологии требовалось усиление вынужденного излучения путем введения в среду положительной обратной связи – помещения ее в резонатор. Только в 1950-х гг. воплощением данной идеи занялась команда профессора физики Колумбийского университета Чарльза Таунса, его аспиранта Джеймса Гордона и научного сотрудника Герберта Цайга. Чарльз Таунс предложил с помощью молекул аммиака сконструировать микроволновой генератор, имеющий несколько энергетических уровней, разделенных электростатическими полями. При переходе на нижний энергетический уровень возбужденные частицы излучали электромагнитные волны, резонирующие со стенками металлической емкости, линейные размеры которой были сопоставимы с длиной испускаемой волны.

Так, в 1954 г. был создан прототип лазера – первый в мире микроволновой квантовый генератор, или мазер (MASER – *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), который был способен генерировать тончайший луч света частотой 100 Гц и мощностью 10 нВт [4]. На тот момент это стало огромным прорывом в оптоэлектронике, а в 1955 г. технология была усовершенствована советскими учеными Александром Прохоровым и Николаем Басовым из Института физики Академии наук СССР путем изменения принципа накачки – трехуровневая система для лазера на пучке молекул водорода. За этот вклад в науку в 1964 г. Таунс, Прохоров и Басов были удостоены Нобелевской премии по физике. Дальнейшие улучшения конструкции лазера сделали возможным использование в качестве активной среды не только газа, но и твердого тела.

Микроволновое излучение мазеров недоступно человеческому глазу, что требовало перехода в оптический диапазон. Сдвиг излучения квантовых генераторов в данную часть спектра был осуществлен еще в 1957 г. в теоретических трудах Таунса и его аспиранта Колумбийского университета Гордона Гулда, впоследствии запатентованного полностью обоснованный концепт технологии, а также саму аббревиатуру LASER – усиление света с помощью стимулированного испускания излучения.

На практике первый лазер был разработан в 1960 г. сотрудником корпорации Hughes Aircraft

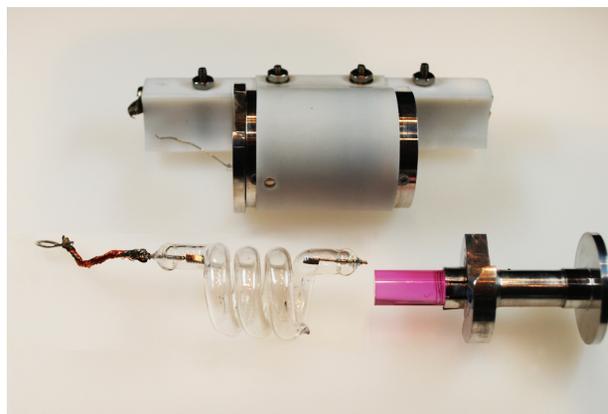


Рис. 1. Внешний вид деталей рубинового лазера. Вверху показан корпус лазера, внизу слева – спиральная газоразрядная лампа, справа – кристалл рубина.

Теодором Мейнманом на основе рубинового стержня в качестве активной среды (в роли излучателя использовалось напыление хрома на полированные торцы стержня, а слой серебра применялся в качестве оптического резонатора) [5]. Источником накачки служил электрический разряд в газоразрядной спиральной лампе, накрученной на стержень. Конструкция первого рубинового лазера представлена на рис. 1 [6–9].

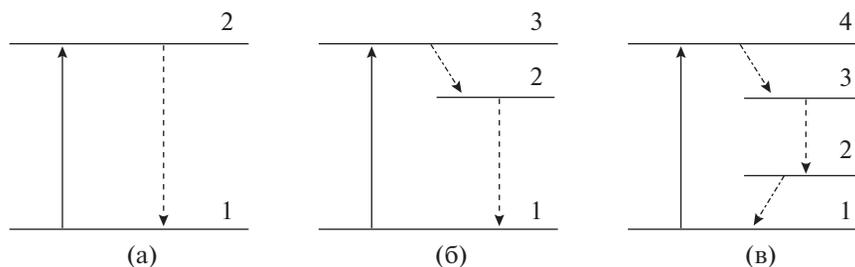
Появление первого лазера показало его научную и практическую значимость, что увеличило интерес к данной области исследований и вызвало активную исследовательскую деятельность множества ученых и инженеров из разных стран. Так, практически сразу после создания рубинового лазера в Лабораториях Белла был запущен первый газовый гелий-неоновый лазер, созданный Али Джаваном, Уильямом Беннеттами и Дональдом Хэрриотом [10, 11].

В 1961 г. заработал первый лазер на неодимовом стекле. В течение следующих пяти лет были разработаны полупроводниковые лазерные диоды, лазеры на двуокиси углерода, химические лазеры, лазеры на органических красителях [12, 13].

Усовершенствование существующих лазерных технологий и проектирование новых происходит непрерывно с момента создания и продолжается уже на протяжении более 60 лет, в связи с чем происходит расширение горизонтов применения лазеров [14, 15].

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРА

Важно иметь представление о физических основах исходной технологии, чтобы вносить конструктивные изменения, ведущие к повышению эффективности работы устройств, основанных на ней. Физической основой работы лазера слу-



**Рис. 2.** Инверсная заселенность уровней; а – двухуровневая система, б – трехуровневая, в – четырехуровневая. Сплошной линией показана накачка, пунктирной – излучательный переход, штрихпунктирной – безызлучательный.

жит явление вынужденного (индуцированного) излучения. Как было отмечено, возбужденный атом способен излучить фотон под действием другого фотона без его поглощения, если энергия последнего равняется разности энергий уровней атома до и после излучения. При этом излученный фотон когерентен фотону, вызвавшему излучение. Таким образом, происходит усиление света. Поскольку вероятность индуцированного излучения возбужденного атома равна вероятности поглощения этого фотона невозбужденным атомом, для усиления света необходимо обеспечить преобладание количества возбужденных атомов в среде. Это явление называется инверсией заселенности, и для ее создания используются системы с различным числом энергетических уровней (рис. 2) [13, 15–17].

В состоянии термодинамического равновесия инверсия населенности не достигается, поэтому применяются различные системы, приводящие к возникновению данного явления, так называемая накачка активной среды [18]. Для получения инверсии населенностей в зависимости от источника энергии, обеспечивающего возбуждение атомов, выделяют следующие методы [19]:

- оптическая накачка;
- электрическая накачка;
- химическая накачка;
- газодинамическая накачка;
- лазерная накачка;
- ядерная накачка.

При этом получаемое лазером излучение является монохроматическим, т.е. в процессе генерации фотоны конкретной длины волны будут доминировать над всеми остальными.

Такой механизм принципиально отличается от спонтанного излучения (предполагающего случайные направления распространения, поляризацию и фазу фотонов). Однако именно оно все же является первоисточником генерации фотонов, поэтому для обеспечения вынужденного излучения под действием излученных фотонов необходимо существование положительной обратной связи. Для этого активная среда лазера по-

мещается в оптический резонатор, в состав которого обычно входят два направленных друг на друга зеркала. Одно из них полупрозрачное, частично пропускающее луч лазера. При многократном прохождении в резонаторе в результате отражения пучок исходного излучения вызывает индуцированные переходы частиц среды и сопутствующее им излучение (как непрерывное, так и импульсное). При этом возможно использование различных приборов (вращающиеся призмы, ячейки Керра, обеспечивающие изменение как под действием внешнего электрического поля, так и в его отсутствие поляризационных свойств светового пучка в оптически изотропных средах) для быстрого выключения и включения обратной связи. Таким образом добиваются уменьшения периода импульсов [13, 16, 19].

Кроме того, в связи с особым расположением зеркал в лазерном луче сохраняются лишь фотоны, распространяющиеся в направлении, коллинеарном оптической оси резонатора на небольшом расстоянии от нее, остальные фотоны быстро покидают объем резонатора. В результате чего луч лазера имеет очень малый угол расходимости и строго определенную поляризацию благодаря вводимым в его конструкцию различным поляризаторам (плоские стеклянные пластинки, установленные под углом Брюстера к направлению распространения луча лазера).

### 3. ВИДЫ ЛАЗЕРОВ

Первыми разработанными по данной технологии лазерами были твердотельные. В качестве активной среды используется твердое вещество. Твердотельные лазеры делятся на импульсные и непрерывные. Среди импульсных наиболее используются устройства на рубине и калий-титанил-фосфатные лазеры на неодимовом стекле (длина волны рубинового лазера – 694.3 нм, неодимового – 1.06 мкм). Эти лазеры представляют собой относительно большие стержни длиной 100 см и диаметром 4–5 см. Энергия генерируемого импульса для такого стержня составляет 1000 Дж за  $10^3$  с.



Рис. 3. Устройство гелий-неонового лазера.

Большинство лазеров непрерывного действия изготавливаются на флюорите с примесью диспрозия либо на иттриево-алюминиевом гранате, в котором присутствуют примеси атомов редкоземельных металлов (длина волны этих лазеров находится в области 1–3 мкм). Лазеры на иттриево-алюминиевом гранате способны обеспечить мощность импульса до нескольких десятков ватт [20, 21].

Принципиально особенной разновидностью твердотельных лазеров являются полупроводниковые (диодные) лазеры, в которых рабочим веществом выступает полупроводник. Диодные лазеры обеспечивают перестройку длины волны излучения. В их конструкции могут использоваться различные полупроводники, за счет чего возможно перекрытие интервала длины волн от 0,32 до 32 мкм. Накачка в таком лазере может быть осуществлена непосредственно электрическим током, электронным пучком либо электромагнитным излучением.

Отметим, что полупроводниковые лазеры значительно выделяются по своим характеристикам на фоне лазеров с другими средами. В частности, отличительными особенностями диодных лазеров являются высокий коэффициент полезного действия преобразования исходной энергии механизма накачки в когерентное излучение, малая инерционность и способность полупроводниковых инжекционных лазеров работать в непрерывном режиме, что обуславливает их широкое практическое применение [22].

Следующей ступенью в развитии технологии стало создание газовых лазеров, у которых активной средой выступает газ, способный обеспечить применимость в широком диапазоне частот и высокую оптическую однородность, следствием чего являются максимально высокая направленность излучения и его монохромность.

Наиболее используемым устройством непрерывного действия, работающим в видимой и инфракрасной областях, является гелий-неоновый лазер. Он представляет собой газоразрядную трубку, заполненную смесью гелия и неона и помещенную в оптический резонатор (рис. 3) [16, 18]. Гелий-неоновые устройства подходят для осуществления юстировки в шахтных работах, строительстве разнообразных сооружений. Также

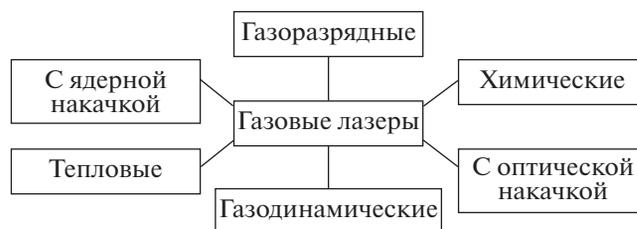


Рис. 4. Классификация газовых лазеров.

с их помощью организуется оптическая связь и разрабатываются квантовые гироскопы.

При этом применение современных способов возбуждения и поддержания газа под высоким давлением способно значительно повысить мощность такого лазера. Существует несколько типов газовых лазеров (рис. 4) [11, 12, 18].

Дальнейшее развитие технологии привело к появлению жидкостных лазеров — активной средой является жидкость. В медицинских лазерах, к примеру, в качестве активной среды выступает раствор органического красителя в этаноле, метаноле или этиленгликоле, поэтому им зачастую приписывают название “лазеры на красителях”. Это обеспечивает ряд существенных преимуществ перед твердотельными или полупроводниковыми аналогами, в частности циркуляция жидкой активной среды осуществляет интенсивное охлаждение элементов устройства, что позволяет изменять длину импульса и мощность излучения в широком диапазоне [20, 22, 23].

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ

Известно множество различных типов лазеров, работающих в широком диапазоне частот (от микроволнового до рентгеновского), что обуславливает широкий спектр их практического использования.

*Твердотельные лазеры*, являясь родоначальниками лазерной технологии, за всю насыщенную историю своего развития нашли применение в различных сферах:

- металлообработка (сварка, резка, лазерное легирование, лазерная наплавка, лазерное напыление) [24–27];
- лазерная маркировка и художественная гравировка изделий [14];
- электроника [12];
- интегральная и волоконная оптика [12, 18];
- физика плазмы [16, 17].

*Газовые лазеры* — исторические последователи твердотельных — активно используются в качестве бескровных скальпелей в хирургии. Нельзя не упомянуть методы фотодинамической терапии в ходе лечения онкологических заболеваний,

при которых используется облучение лазером фотосенсибилизатора, вводимого в злокачественное образование, что вызывает разрушение опухоли посредством фотохимических реакций [18, 20, 29–31]. Газовые лазеры (аргоновые, ксеноновые) также применяются при лечении офтальмологических заболеваний (катаракта, отслоение сетчатки, глаукома и др.) [32, 33].

*Жидкостные лазеры* нашли наиболее широкое применение в медицине в области сосудистой хирургии. Определенный терапевтический эффект используется против гиперпигментации кожи, в лечении шрамов и рубцов, поскольку ликвидация питающих их сосудов приводит к деградации рубцовой ткани, а также при таких кожно-сосудистых явлениях, как телеангиоэктазия, капиллярная гемангиома, лентиго, слабопигментированные пятна различного генеза [34, 35].

Лазеры на красителях приобрели чрезвычайно широкое распространение при изучении особенной разновидности оптических эффектов – голограмм и получении голографических объемных изображений. В частности, жидкостные лазеры способны генерировать монохроматический свет практически любой длины волны, при этом длительность импульсов излучения может достигать  $10^{-16}$  с, и, следовательно, огромных мощностей. Эти свойства используются в спектроскопии, а также при изучении нелинейных оптических эффектов [36].

*Полупроводниковые лазеры* применяются на практике в таких разнообразных областях, как оптическая передача данных, оптическая запись информации, метрология, однако они наиболее распространены в конструкциях физических приборов для прецизионных измерений (сейсмографы, сверхскоростная фотография, лазерные гироскопы).

Важным аспектом их использования, в том числе, являются лазерная локация и системы контроля состава атмосферы. Лазерная локация космических объектов конкретизировала значения ряда основополагающих астрономических констант и способствовала уточнению космологических величин, обогатила представления о структуре атмосферы и составе поверхности планет Солнечной системы. С помощью лазера было измерено расстояние до Луны с точностью до нескольких сантиметров. Для создания искусственных опорных звезд в верхних слоях атмосферы, в телескопах на адаптивной оптической системе коррекции атмосферных искажений также применяют лазеры [18, 20, 36].

Находят широкое применение лазеры в метрологии и измерительной технике, в частности для измерения времени, давления, температуры, скорости потоков жидкостей и газов, угловой скорости (лазерный гироскоп), концентрации веществ,

оптической плотности, разнообразных оптических параметров и характеристик и многих других величин [36, 37].

Сверхкороткие импульсы лазерного излучения используются в лазерной химии для запуска и анализа химических реакций и разделения изотопов. Лазерное излучение обеспечивает точную локализацию, дозированность, абсолютную стерильность и высокую скорость ввода энергии в систему.

В настоящее время разрабатываются различные системы лазерного охлаждения, рассматривается возможность создания управляемого термоядерного синтеза с помощью лазеров, а также системы манипулирования отдельными атомами и молекулами [38].

Уникальной разрабатываемой сегодня технологией является поляритонный лазер. Особенность его конструкции – наличие экситонов (пара “дырка” – электрон) в активной среде широкозонного полупроводника нитрида галлия, которые, будучи бозонами-коллективистами, способны находиться на каждом из возможных энергетических уровней в любом количестве. В результате накачки внешним электрическим полем экситоны при встрече с фотоном превращаются в поляритоны (фотон, взаимодействующий с возмущениями среды), которые впоследствии испускают вторичный фотон, обеспечивая вынужденное излучение.

Использование бозонов обуславливает преимущество поляритонного лазера, так как позволяет работать с минимальным энергопотреблением (в 250 раз меньше, чем у полупроводникового лазера) [39, 40]. Кроме того, данная технология не нуждается ни в чем, кроме источника питания, и за счет своей компактности и автономности легко интегрируется с полупроводниковыми чипами, обеспечивая основу для квантовых вычислений. Последовательная оптимизация поляритонных лазеров уже вносит коррективы в существующие технологии квантовых компьютеров [39]. На данный момент разработан компьютер на 51 кубите.

Еще одним из важных и перспективных прикладных аспектов является способность поляритонов светить в терагерцевом (субмиллиметровом) диапазоне, что может быть использовано в сканирующих устройствах за счет возможности волны данной части спектра проходить сквозь множество материалов. Гипотетически это позволит фиксировать положение людей и объектов за непрозрачными препятствиями. Этот проект находится в стадии теоретической модели, но имеет большой потенциал для реализации.

Вызывающую интерес альтернативную технологию представляют собой гибкие лазеры – с активной средой, в качестве которой выступают перовскиты (минералы с формулой титаната кальция  $\text{CaTiO}_3$ ) – высокоэффективные фотогальваниче-

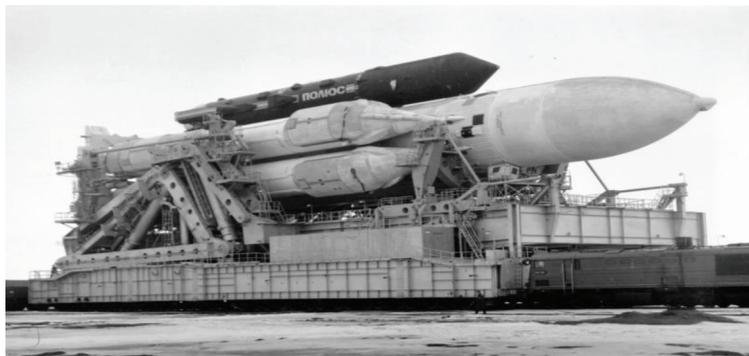


Рис. 5. Сверхтяжелая ракета-носитель с установкой «Скиф-ДМ» на борту.

ские материалы. Принципиальное отличие данного типа от их полупроводниковых аналогов заключается в более экономичном изготовлении с использованием любых гибких основ, что подразумевает исключение сложной технологии напыления в вакуумных камерах при высоких температурах и переход к «спин-коатеру» [40]. Данная технология может быть применена в производстве гибких сенсоров, фотодетекторов, светодиодов. Актуальна, в том числе, комбинация перовскитов с гибридными органо-неорганическими материалами и углеродными нанотрубками для создания высокотехнологичных устройств в области нанофотоники. Относительно новым направлением в развитии лазеров является появление полупроводниковых лазеров на квантовых точках.

## 5. ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В ВОЕННОЙ СФЕРЕ

Применение лазеров актуально и в военных целях, например в качестве технологий точного наведения. Ведутся разработки военной техники на основе мощных лазеров, боевых систем защиты воздушного, морского и наземного базирования.

Применение лазеров в вооруженных силах с середины XX века стало перспективным направлением. Их применение наметилось главным образом для оптико-электронных систем, решения задач разведки и целеуказания. Для выполнения поставленных задач лазеры должны обладать высокой мощностью, удовлетворительной системой охлаждения и приемлемыми габаритами. Помимо габаритов требовались достаточные вычислительные мощности и технические возможности для того, чтобы обеспечить своевременное и точное наведение лазера на цель.

Одними из первых начали разработку боевого лазера США в рамках программы Стратегической оборонной инициативы в конце XX века. Предполагалось размещение на околоземной орбите лазерного оружия для поражения советских меж-

континентальных баллистических ракет. План оказался слишком амбициозным, и после появления многочисленных трудностей было решено закрыть программу. Однако в ходе выполнения поставленных задач были проведены прорывные разработки в области лазеростроения: представлен лазер на фториде дейтерия с выходной мощностью до 2.2 МВт. Заявлено, что он разрушил жидкостную баллистическую ракету, зафиксированную на расстоянии 1 км от установки. В результате десятисекундного воздействия корпус ракеты потерял прочность и был разрушен.

СССР также проводил исследования и испытания в области создания лазеров в военных целях. Известно о работах по созданию орбитальной платформы с газодинамическим лазером «Скиф» (рис. 5) [41].

Скиф-ДМ имел длину 37 м, максимальный диаметр 4.1 м и массу ~80 т. Он состоял из двух основных отсеков: меньшего – функционально-служебного блока и большего – целевого модуля. Заявленная мощность лазера 100 кВт. В ходе эксперимента по размещению установки массогабаритный макет «Скиф-ДМ» на космическом аппарате «Полнос» был выведен на околоземную орбиту, но в ходе эксперимента не вышел на расчетную орбиту и потерпел крушение. Дальнейшие разработки были приостановлены из-за распада СССР.

Перспективным направлением является разработка лазерных комплексов на подвижных платформах. СССР вел разработки лазерного комплекса с газодинамическим углеродным лазером (рис. 6). Проект первоначально реализовывался на базе военного транспортного самолета Ил-76МД, модифицированного до самолета А-60. Данный лазерный комплекс имел название «Ладога» и был спроектирован в рамках программы «Терра-3». А-60 представлял собой летающую лабораторию, оснащенную лазером мощностью 100 кВт. С помощью него были проведены испытания, в которых опытной целью являлся стратосферный аэростат.

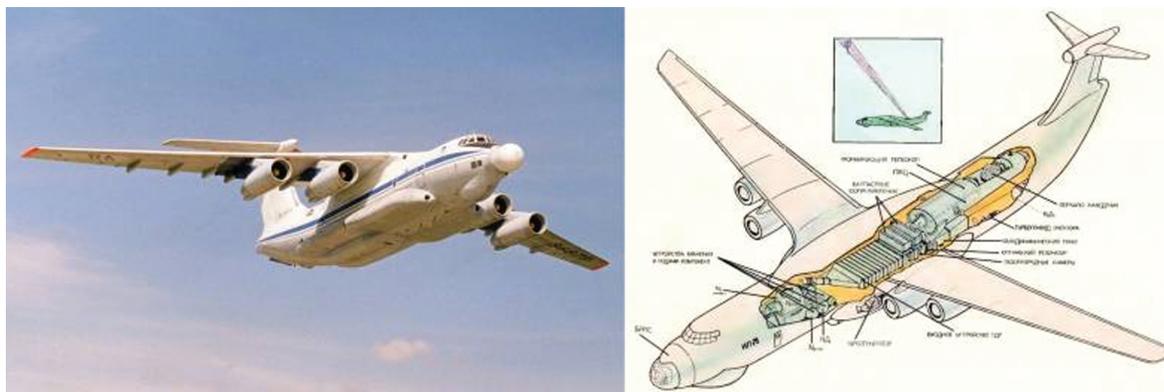


Рис. 6. Лазерный комплекс воздушного базирования А-60.

В 2012 г. в России возобновили разработку боевого авиационного лазера, способного поражать самолеты, спутники и баллистические ракеты. Разработкой опытных образцов авиационного базирования занимался НПО “Алмаз” (входит в концерн ВКО “Алмаз–Антей”). Разработка будет использоваться для противодействия разведывательным средствам на земле, воде, в воздухе и космосе.

Летные испытания комплекса начались в октябре 2016 г. Наземная отработка оборудования российского самолета А-60, который предполагается оснащать лазерным оружием, уже завершена [42].

Лазерные установки используются и на базе вертолетов Ми-8 в качестве оборонительного средства, демонстрирующего свою высокую эффективность.

Образцы лазерной системы защиты вертолетов Ми-28НЭ от крылатых ракет представлены концерном “Радиоэлектронные технологии”. Первые серийные лазерные станции для защиты экспортной модификации “Ночного охотника” (Ми-28НЭ) успешно прошли заводские испытания.

Представленная лазерная станция способна подавлять одновременно не менее двух атакующих ракет и представляет собой только один из компонентов многофункционального бортового комплекса обороны, что значительно повышает его эффективность. Боевой вертолет Ми-28НЭ является экспортной модификацией Ми-28Н “Ночной охотник”. Машина предназначена для поиска и уничтожения днем и ночью, в простых и сложных метеоусловиях малоскоростных воздушных целей, танков, бронированной и небронированной техники, а также живой силы противника [43].

В последние годы в России прорабатываются и внедряются проекты по вооружению истребителей лазерным, РЭБ- и СВЧ-оружием. Например, планируется установить лазерное оружие на истребителе МиГ-35. Су-57 уже стал первым в мире

истребителем с установленной системой управляемого противодействия ИК-средствам противника. Данная система умеет “ослеплять” приближающиеся к самолету ракеты класса “воздух–воздух”. Раньше такие системы из-за их громоздких размеров ставили только на военно-транспортные самолеты. Российским ученым удалось создать миниатюрное устройство, благодаря которому Су-57 стал обладателем уникального для мировой авиации средства самозащиты [44].

В конце 2019 г. было дано согласие на дальнейшую разработку проекта, начатого 23 декабря 2002 г. под названием “Сокол-Эшелон”. Это лазерная система воздушного базирования для поражения воздушных целей (спутниковые системы, аэростаты, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и др.). На борту “Сокола-Эшелона” установлен углекислотный лазер, работающий в ИК-части спектра и направленный на засвечивание оптических систем. Очевидным преимуществом являются гибкость данного комплекса в выборе целей и независимость от погодных условий.

США вели разработку лазерного комплекса, установленного на борту самолета Boeing, по проекту “Airborne Laser” – YAL-1/747-400F (рис. 7). Задачей комплекса стояло поражение баллистических ракет. Данная боевая авиационная лазерная система имела общую массу ~300 т и состояла из основного мегаваттного йоднокислородного лазера и трех вспомогательных – твердотельных Nd:YAG и Yb:YAG и газового CO<sub>2</sub>-лазера.

Для подсветки корпуса ракеты-мишени применялся Nd:YAG-лазер, а отраженный луч этого лазера фиксировался адаптивной оптикой. Полученный сигнал применялся для учета атмосферной турбулентности и фазовых искажений луча, идущего через атмосферу.

Волоконный лазер мощностью 10 кВт на основе Yb:YAG применялся для подсветки носовой части мишени и участвовал в формировании устойчивого изображения в системе слежения.

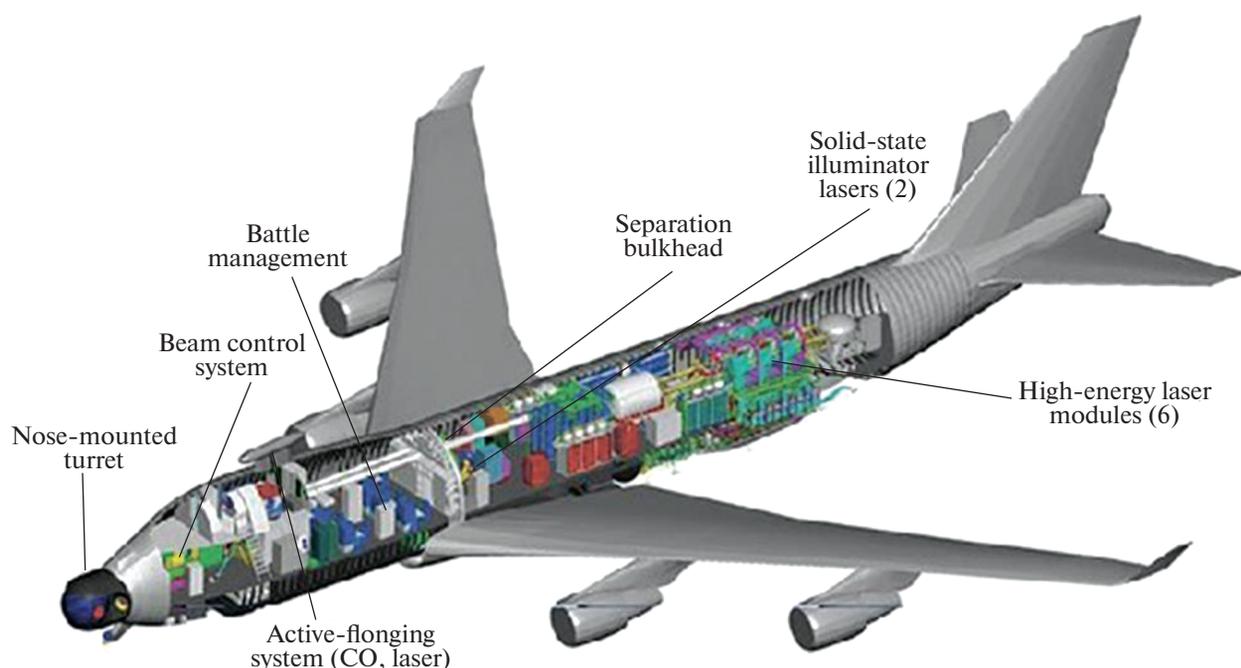


Рис. 7. Боевая авиационная лазерная система на базе YAL-1A с размещением на борту Boeing 747-400F.



Рис. 8. Результат воздействия боевых лазеров на различные материалы.

Углекислотный лазер использовался для измерения расстояния до каждой отслеживаемой боеголовки — потенциальной мишени. На рис. 8 приведены результаты воздействия боевых лазеров на различные материалы, полученные американцами в ходе испытаний.

После проведенных натурных испытаний по поражению ракет была зафиксирована низкая эффективность данного подхода, несмотря на поражение учебных целей на расстоянии до 100 км — ракеты-мишени с жидкостным ракетным дви-

гателем и твердотопливной ракеты-мишени. Кроме того, система требовала сопровождения истребителями и не должна входить в зону действия противовоздушной и противоракетной обороны противника, так как представляет достаточно легкую мишень. Помимо этого, разработка системы YAL-1A стоила ~5 млрд дол. США, а производство одного такого самолета оценивается 1–1.5 млрд дол. США. Ввиду высокой стоимости в декабре 2011 г. проект закрыли из-за недостатка финансирования [45, 46].



Рис. 9. Комплекс 1К17 “Сжатие”.

(а)



(б)



Рис. 10. Боевые бронированные автомобили “Страйкер” (а) и “HELMD” (б).

Ведутся разработки по размещению лазерных установок в стационарном исполнении и на подвижном шасси. В 1992 г. поступил на вооружение лазерный комплекс 1К17 “Сжатие” (рис. 9). Комплекс обладал системой из 12 оптических каналов, каждый из которых обладал независимой системой наведения. Это позволяло сделать установку многодиапазонной для преодоления светофильтров.

США представили несколько своих разработок: бронемобиль “Страйкер” и лазерный комплекс “HELMD”, размещаемый на грузовике (рис. 10). “Страйкер” оснащен боевым мобильным высокоэнергетическим лазером с заявленной мощностью 5 кВт, поразившим БПЛА на испытаниях.

По результатам испытаний комплекса “HELMD” лазер мощностью 10 кВт поразил более 90 минометных снарядов, включая 60 мм снаряды и БПЛА. Общее количество пораженных целей – 150 единиц [47].

Для нужд вооруженных сил Израиля в 2014 г. была разработана лазерная система противоракетной обороны “КеренБарзель” (рис. 11). Заявлено поражение 90% целей, включающих в себя мины, снаряды, БПЛА при более 100 испытаниях. Предполагаемая мощность лазера – более 10 кВт.

Для нужд Вооруженных Сил Российской Федерации разработали станцию активных помех Л-370-3С в рамках комплекса бортовой защиты “Витебск” (рис. 12). Ее назначение – противодействие подлетающим ракетам противника, оснащенным тепловой головкой самонаведения, путем ослепления излучением в ИК-диапазоне [43, 48].

В 2018 г. в ходе обращения Президента к Федеральному Собранию Верховным Главнокомандующим был анонсирован лазерный комплекс “Пересвет” (рис. 13), предназначенный для “ослепления” оптико-электронных приборов на космических аппаратах противника и разрушения их компонен-



Рис. 11. Комплекс “Керен-Барзель” во время боевой работы.

тов, поскольку запланированной мегаваттной мощности для этого вполне достаточно, а также для уничтожения воздушных, морских и наземных целей. Его модификации планируется использовать в различных вариантах базирования для создания боевых лазеров различной мощности и дальности воздействия. Комплекс “Пересвет” заступил на боевое дежурство 1 декабря 2019 г. [49, 50].

## 6. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Лазер является перспективной технологией, способной раздвинуть горизонты человечества. С каждым годом лазеры все шире применяются в науке, промышленности и военном деле. Общее



Рис. 12. Станция активных помех Л-370-3С.

развитие лазеров и связанных с ними технологий идет в основном в следующих направлениях: повышение мощности излучения, уменьшение массы и размеров установок, повышение эффективности преобразования энергии.

Научные исследования с применением лазеров позволяют изучать макроскопические объекты, строение целых галактик и Вселенной, но они же позволяют заглядывать в микромир и узнавать больше о природе вещества, уточнять фундаментальные физические константы, изучать гравитацию. Лазерный интерферометр “LIGO” впервые позволил с достаточной точностью зафиксировать гравитационные волны и приблизить нас к пониманию природы последней, четвертой фундаментальной силы, стать на шаг ближе к “Теории великого объединения”.

Развитие электроники, оперирующей фотонами вместо электронов (фотоники), а также создание квантовых компьютеров немыслимо без применения лазерных систем. Развитие данного направления сможет обеспечить рост производительности вычислений, что, в свою очередь, позволит решать более сложные научные и технические задачи.

Перспективным направлением развития является лазерная связь на дальние расстояния, что особенно важно для управления космическими аппаратами, а также передачи на них энергии посредством лазерного луча. Другим направлением, не менее перспективным, является развитие двигателей космических аппаратов. Здесь лазеры дают возможность развить технологии абляционных ионных двигателей, а также новых типов двигателей, способных ускоряться за счет лазерных лучей, достигая недоступных сегодня скоростей и повышая точность орбитальных маневров.



Рис. 13. Лазерный комплекс «Пересвет».

Применение лазеров в энергетике открыло альтернативный путь реакций термоядерного синтеза. Несмотря на то что задача получения и удержания термоядерной плазмы в лазерных системах не решена, это один из самых перспективных путей развития. Другой важный аспект использования лазеров в реакторах термоядерного синтеза — это возможность получения более высоких локальных температур, что позволит вовлечь в процессы термоядерного синтеза более тяжелые ядра химических элементов.

Военное применение лазеров сегодня сводится к системам оборонительного характера, связанного с ослеплением систем наведения противника и уничтожения средств наблюдения. Основной задачей применения лазеров в будущем будет увеличение мощности таких систем и, как следствие, уменьшение времени необходимости удержания лазерного луча на цели.

Ранее считалось, что мощность лазеров, необходимая для физического уничтожения объектов, недостижима, однако созданные в последние годы комплексы борьбы с воздушными целями позволяют говорить о том, что в ближайшем будущем могут быть созданы средства, способные уничтожать и более крупные объекты, такие как космические аппараты, авиация и бронетехника.

Не менее важной проблемой применения лазерных систем в боевых условиях является зависимость лазеров от атмосферных и климатических условий. В зависимости от погодных условий (туман, дождь, пыль, влажность) лазерный луч может терять значительную долю своей энергии, что требует пропорционального увеличения мощности излучателей. Кроме того, различные атмосферные эффекты приводят к изменению пути лазера и рассеянию луча. Это приводит к усложнению систем наведения и фокусировки лазера для компенсации данных эффектов.

Эти проблемы снимаются при переходе в космическое пространство, что в совокупности с высокой скоростью распространения делает лазерное оружие наиболее эффективным в системах космического вооружения, которые также могут применяться для устранения угрозы падения крупных астероидов на поверхность планеты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наука о лазерах и лазерной технологии активно развивается. Исследования с использованием лазеров открывают новые горизонты в физике элементарных частиц, космологии, понимании фундаментальных законов вселенной и в перспективе могут дать новый источник экологически чистой энергии. Техника на основе лазеров уже давно стала неотъемлемой частью нашей повседневной жизни.

Открытия последних лет позволили усовершенствовать существующие конструкции лазеров, а также создать несколько принципиально новых типов, обладающих высокой мощностью, эффективностью преобразования энергии, высокой надежностью и значительной компактностью, что дает новые возможности их применения в разных отраслях промышленности.

Применение лазеров в военном деле расширяется. На основе лазеров создается множество комплексов наземного, авиационного и морского базирования. Среди них системы, предназначенные для ослепления систем наведения, борьбы со снарядами и БПЛА противника, поражения баллистических ракет. В перспективе создание комплексов борьбы с орбитальной группировкой, а также средств поражения авиации и бронетехники противника.

Лазеры и системы на их основе представляют собой одно из перспективных направлений развития, а это значит, что в ближайшем будущем,

возможно, увидим новые образцы техники и вооружения, и лазер займет свое место на поле боя в качестве полноценного вооружения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крюков П.Г.* Лазер – новый источник света. М.: Бюро Квантум, 2009. С. 176 (Библиотечка “Квант”. Вып. 110. Приложение к журналу “Квант” № 2. 2009).
2. Физическая энциклопедия / Гл. ред. Прохоров А.М. Т. II. Добротность—Магнитооптика. М.: Сов. Энциклопедия, 1990. С. 703.
3. Физика. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. Прохоров А.М. 4-е изд. М.: Большая Российская энциклопедия. 1999. С. 944.
4. *Сигмен А.* Мазеры. М.: Мир, 1966. 520 с.
5. *Mainman T.H.* // Nature. 1960. V. 187. № 4736. P. 493.
6. *Рембеза Е.С.* Квантовая, атомная и ядерная физика: курс лекций: учеб. пособие Воронеж: ФГБОУ “Воронежский государственный технический университет”, 2011. 135 с.
7. *Федоров Б.Ф.* Оптические квантовые генераторы. М.: Энергия, 1966.
8. *Федоров Б.Ф.* Лазеры и их применения. М.: Энергия, 1973.
9. *Борейшо А.С.* Лазеры: устройство и действие. СПб.: Мех. ин-т. СПб, 1992. 215 с.
10. *Шавлов А., Фогель С., Далберджер Л.* Оптические квантовые генераторы (лазеры), пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
11. Энциклопедический словарь юного физика / Сост. Чуянов В.А. 2-е изд., испр. и доп. М.: Педагогика, 1991. 336 с.
12. *Гонда С., Сэко Д.* Оптоэлектроника в вопросах и ответах: Пер. с японского. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние. 1989. 184 с.
13. *Звелто О.* Физика лазеров, пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1979.
14. Справочник по лазерам / под ред. Прохорова А.М. пер. с англ. в 2 т. М.: Советское радио, 1978.
15. *Тарасов Л.В.* Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981 г.
16. *Айрапетян В.С., Ушаков О.К.* Физика лазеров. Новосибирск: СГГА, 2012. 134 с.
17. *Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г.* Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Квантовые излучатели / Учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2014. 44 с.
18. *Тимченко Е.В.* Оптика лазеров. Самара. 2013. 134 с.
19. *О’Ши Д., Коллен Р., Родс У.* Лазерная техника, пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1980.
20. *Maiman T.* The Laser Odyssey. Laser Pr. 2000. P. 216.
21. *Maiman T.* // Nature. 1960. V. 86. № 4736. P. 493.
22. *Lhazov L.D.* // Optikomexhanicheskaya promishlennost’, 1961. № 1. P. 48.
23. *Javan A., Bennett W.R. Jr., Herriott D.R.* // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6. P. 106.
24. *Масайло Д.В.* “Разработка ресурсосберегающей технологии производства сферических порошковых материалов из техногенных отходов машиностроения (стружки) и их использование в аддитивных технологиях” Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2019.
25. *Gvozdev A.E., Minayev I.V., Tikhonova I.V. et al.* // Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий. Сб. тез. III Всерос. науч. семинара с международным участием. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. С. 27.
26. *Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В. и др.* Особенности лазерной резки медных и алюминиевых сплавов. Тула. 2019.
27. *Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В. и др.* // Материаловедение. 2019. № 10. С. 25.
28. *Meisel P., Kocher T.* // J. Photochem. Photobiol. 2005. V. 79. P. 159.
29. *Vitteman V.D.* CO<sub>2</sub>-laser. Moscow: Mir Publ., 1990. P. 360.
30. *Миронов А.Ф.* // Итоги науки и техники. Совр. пробл. лаз. физ. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 3. С. 5.
31. *Верле Д.* // Изв. РАН. Сер. хим. 1998. № 5. С. 836.
32. *Лозовская Е.Л. и др.* // Биофизика. 1997. № 3. С. 549.
33. *Лозовская Е.Л. и др.* // Вопросы медицинской химии. 1998. № 2. С. 118.
34. *Неворотин А.И.* // Лазерная биология и лазерная медицина: практика. Мат. докл. респ. школы-семинара. Ч. 2. Тарту; Пюхьяярве: Изд-во Тартуского университета ЭССР, 1991. С. 3.
35. *Додвер Дж.С.* Лазеро- и светолечение. М.: Рид Элсивер, 2010. С. 5.
36. Промышленное применение лазеров / под ред. Кебнера Г. пер. с англ. М. 1988.
37. *White A.D., Rigden J.D.* // Proc. IRE. 1962. V. 50. № 7. P. 1697.
38. *Басов Н.Г., Розанов В.Б., Соболевский Н.М.* // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1975. № 6.
39. *Savvidis P.G., Baumberg J.J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 1547.
40. *Bhattacharya A., Baten Z.Md, Iorsh I. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. № 6. P. 067701.
41. *Глушко В.П.* Развитие ракетостроения и космонавтики в СССР. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, С. 304 с.
42. *Сысуев С., Умеренков С., Игнатов А., Рачкин С.* // Армейский сборник Журнал Министерства обороны Российской Федерации. <http://army.ric.mil.ru/Stati/item/255977/>
43. *Бессарабова М.* Слепить и уничтожить: Россия готовит супероружие. <http://rueconomics.ru/194558-oslepit-i-unichtozhit-rossiya-gotovit-superoruzhie>

44. *Раскольников В.* Испытанный в Сирии Су-57 получит новейшие средства поражения. <https://politexpert.net/178911-ispytannyyi-v-sirii-su-57-poluchit-noveishie-sredstva.yandex.com>
45. *Игнатов А.Г.* // История науки и техники. 2016. № 4. С. 55.
46. *Игнатов А.Г.* Россия и США. Лазеры в системах ПВО и ПРО. [Электронный ресурс] Academic Publishing. <http://morebooks.de>.
47. Лазерное оружие трех супердержав. [http://vprk-news.ru/news/35662\\_16/03/2017](http://vprk-news.ru/news/35662_16/03/2017)
48. Рассекречено: Какое лазерное оружие получила российская армия. <http://warfiles.ru/show-125190-rassekrecheno-kakoe-lazernoe-oruzhie-poluchila-rossiyskaya-armiya.html>
49. *Рябов К.* Новости проекта “Пересвет” [https://topwar.ru/141171-novosti-proekta-peresvet.htmlutm\\_source=website&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=group](https://topwar.ru/141171-novosti-proekta-peresvet.htmlutm_source=website&utm_medium=social&utm_campaign=group)
50. *Колчин А.* Опережая США: российские лазерные комплексы “Пересвет” имеют преимущество. <https://politexpert.net/97677-operezhaya-ssha-rossiiskie-lazernye-kompleksy-peresvet-imeyut-preimushestvo>