

Лазерная техника и безопасность. Вчера, сегодня, завтра. Часть 1¹

Б.Н. Рахманов, д-р техн. наук, профессор¹

Ю.П. Пальцев, руководитель группы электромагнитных излучений, д-р мед. наук, профессор²

В.Т. Кибовский, эксперт³

В.А. Девисилов, канд. техн. наук, доцент¹

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

² Научно исследовательский институт медицины труда Российской академии медицинских наук²

³ Центр по оценке соответствия и подтверждению качества оборудования, изделий и технологий АНО «АтомТехноТест»

e-mail: rbn8@yandex.ru

Ключевые слова:

лазерное излучение,
лазерная техника,
лазерная безопасность,
классификация лазеров,
лазерная дозиметрия,
методы дозиметрического контроля,
открытые пространства,
нормативные документы,
стандарты,
технические регламенты,
государственное регулирование.

Рассмотрены вопросы исторического развития лазерной техники военного и гражданского назначения, а также исторические аспекты становления и современного состояния в области лазерной безопасности в России и за рубежом. Рассмотрены вопросы биологического действия лазерного излучения и принципы его нормирования. Проведен обзор основных нормативных документов в области лазерной безопасности и дозиметрии. Обоснована необходимость совершенствования методов государственного регулирования в области лазерной безопасности.

1.1. От электрической лампы до лазера

Жизнь современного человека немислима без использования лазерной техники. Лазерные устройства у несколько десятилетий широко применяются в оборонной отрасли, промышленности, медицине, научных исследованиях. Развитие наукоемких технологий невозможно без использования лазеров. В настоящее время поставлена задача всестороннего развития и совершенствования лазерной техники как важнейшей составляющей современной фотоники.

В июне 2013 г. распоряжением Правительства РФ утвержден план мероприятий для обеспечения приоритетного развития технологий фотоники в России («дорожная карта» развития оптоэлектронных технологий — фотоники) [1]. «Дорожной картой» предусматривается разработка технического регламента Таможенного союза по безопасности лазерной

продукции, гармонизированного со стандартами Европейского союза (далее ТР ТС ЛБ) к 2016 г. Межгосударственный нормативно-правовой акт в виде ТР ТС ЛБ, принятый странами Таможенного союза (ТС) и ЕврАзЭС, а в дальнейшем — странами Европейско-Азиатского Экономического Союза (ЕАЭС), созданного 29 мая 2014 г., станет основой модернизированной системы лазерной безопасности (ЛБ), действующей в России и в странах ТС и ЕАЭС. При этом возможность гармонизации ТР ТС ЛБ со стандартами Европейского союза (ЕС) в настоящее время представляется весьма проблематичной из-за противоречий между зарубежными и отечественной нормативными базами (НБ) в области ЛБ.

Лазерное излучение (ЛИ) представляет собой гомогенный физический фактор производственной и окружающей среды, представляющий зна-

¹ В первой части обзора рассматриваются исторические аспекты развития лазерной техники.

² В октябре 2013 г. в рамках реформы объединены РАМН, РАСХН и РАН.

чительную опасность для организма человека, прежде всего из-за крайне высокой плотности энергии, распространяющейся в виде узконаправленных лазерных пучков. Диапазон частот и длин волн ЛИ («LASERS») показан условно на шкале электромагнитного излучения (ЭМИ), приведенной на рис. 1 [2]. ЛИ занимает часть оптического диапазона («OPTICAL RADIATION») с длиной волн от 180 до 10^5 нм, который включает диапазон видимого светового излучения («VISIBLE LIGHT») с длиной волн λ от 380 до 750 нм, часть ультрафиолетового (УФ) излучения («ULTRA VIOLET») в диапазоне λ от 180 до 380 нм и часть инфракрасного (ИК) излучения («INFRARED») в диапазоне λ от 750 до 10^5 нм. Спектральный интервал длин волн от 750 до 1400 нм, широко используемый в лазерной технике, называют «ближней ИК областью спектра».

Первые гомогенные источники электромагнитных излучений (ЭМИ), генерирующие излучение в низкочастотной области, появились в XIX в., благодаря техническому воплощению идеи создания источников электрического тока и способов передачи электрической энергии на большие расстояния. Создание первых электрических источников и генераторов ЭМИ связано с именами Х. К. Эрстеда, А. М. Ампера, М. Фарадея.

Фарадей открыл электромагнитную индукцию (1831 г.) и законы электролиза (1834 г.), ввел понятие электрического и магнитного полей. Венцом исследований электромагнетизма стала разработка Д. К. Максвеллом теории электромагнитных явлений. В 1873 г. он вывел уравнения, связывающие электрические и магнитные характеристики поля.

С появлением первых электротехнических устройств стала возможной реализация давней мечты человечества — создание искусственных ярких источников световой энергии. Люди начали активно осваивать крайне узкий диапазон видимого ЭМИ с длиной волн от 380 до 750 нм («VISIBLE LIGHT», рис. 1). Появление первой электрической лампы датируется 1860 г., когда Ж. Сван создал рабочую модель. В 1879 г. Т. Эдисон запатентовал в США усовершенствованное устройство. Создание электрических источников света связано с именами русских ученых П. Н. Яблочкова и А. Н. Лодыгина. Яблочков изобрел лампу, основанную на ярком свечении электродугового разряда («свеча Яблочкова»). Лодыгин усовершенствовал лампу накаливания Эдисона, работающую на принципе свечения тонких угольных нитей. В 1890 г. Лодыгин заменил угольную нить металлической проволокой из тугоплавкого вольфрама, имевшей температуру накала 3385 градусов. Однако промышленное изготовление таких ламп началось только в XX в.

Одновременно с освоением видимого диапазона ЭМИ началась практическая реализация теор-

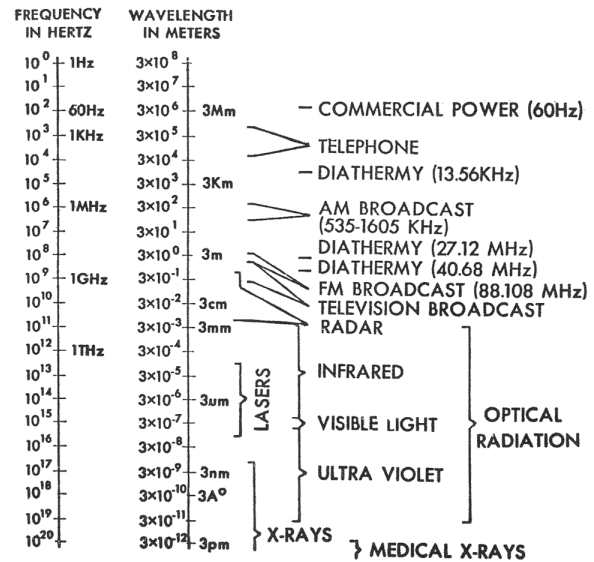


Рис. 1. Шкала электромагнитного излучения

рии Максвелла, выразившаяся в создании телефона (А. Белл, 1876 г.), а затем методов и устройств беспроводной передачи информации — радио (А. С. Попов, Г. Маркони, 1895 г.) и телевидения (В. К. Зворыкин, 1923 г.). Началось активное освоение длинноволнового, средневолнового и коротковолнового радиочастотного диапазона ЭМИ («AM BROADCAST») от 30 кГц до 26,1 МГц, а позднее и ультракоротковолнового (УКВ) радиочастотного диапазона ЭМИ («FM BROADCAST») и «TELEVISION BROADCAST», рис. 1) от 87,5 до 108 МГц («европейский» УКВ диапазон).

Вопросы биологического воздействия ЭМИ в освоенных в то время световых и радиочастотных диапазонах не привлекали особого внимания медиков и биологов. Эти виды ЭМИ не рассматривались как физические факторы, неблагоприятные для организма человека. Только с развитием мощной сверхвысокочастотной радиолокации (рис. 2) человечество вошло в частотный диапазон ЭМИ («RADAR», рис. 1) от десятков МГц до десятков ГГц, представляющий серьез-



Рис. 2. Современный радар на основе фазированной антенной решетки

ную опасность для здоровья человека. Начала формироваться система электромагнитной безопасности (ЭМБ), имеющая своей целью защитить человека от неблагоприятного действия высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) излучений, а позднее и от низкочастотных электрических и магнитных полей.

В конце XIX в. началось освоение мегавысокочастотного диапазона ЭМИ (нижняя область длин волн λ , рис. 1). Были созданы источники рентгеновского излучения («X-RAYS») в частотном диапазоне от $3 \cdot 10^{16}$ – $6 \cdot 10^{19}$ Гц, а затем гамма излучения (частоты более $6 \cdot 10^{19}$ Гц), которые оказались чрезвычайно опасными для человека. Однако крайне узкая исследовательская сфера применения указанных источников ЭМИ в то время не предполагала создания какой-либо специальной системы безопасности. Однако к концу Второй мировой войны после атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки человечество столкнулось с наращиванием атомного, а позднее термоядерного оружия (рис. 3).

Возникла необходимость решить проблемы обеспечения радиационной безопасности (РБ). Паритет в ядерных военных арсеналах СССР и США, достигнутый к концу 1960-х годов, позволил снизить потенциальную военную ядерную угрозу с помощью различных международных и двухсторонних договоров. Проблема РБ переместилась в сферу мирного использования атомной энергии. Распространение атомных электростанций по всему миру потребовало создания системы глобальной ядерной безопасности (ГЯБ), тем более что человечество столкнулось со страшными примерами проявления ядерной угрозы в виде катастроф на Чернобыльской АЭС и японской АЭС Фукусима-1.

Из всех перечисленных выше видов «рукотворных» ЭМИ лазерное излучение самое молодое. ЛИ было получено в результате исследований в области создания генераторов узкополосного когерентного излучения пучков молекул, излучающих в микроволновом радиочастотном диапазоне ЭМИ. Сначала в США был



Рис. 3. Испытание термоядерной бомбы на атолле Бикини, 1954 г. Мощность взрыва 11 Мт



Рис. 4. Нобелевские лауреаты А. М. Прохоров, Н. Г. Басов, Ч. Таунс

создан «МАЗЕР» (Ч. Таунс, 1954 г.) — микроволновый генератор стимулированного излучения («Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation») [3, 4]. Практически одновременно первые мазеры были созданы и в СССР (Н.Г. Басов, А.М. Прохоров, 1954 г.) [5, 6]. Эти ученые были удостоены в 1964 г. Нобелевской премии по физике за создание мазеров и лазеров (рис. 4).

Приведем краткую историю появления «ЛАЗЕРА» (аббревиатура выражения: «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation»), изложенную в [7]. (Небольшие изменения и дополнения к цитируемым текстам выделены *курсивом*, текст, заслуживающий особого внимания, выделен полужирным шрифтом, а в авторском тексте — *курсивом*.)

«Первый лазер... был создан (в США. — Авт.) Теодором Мейманом из фирмы Hughes... 16 мая 1960 года (в 2015 г. исполнится 55 лет со дня изобретения лазера. — Авт.). Это был импульсный **рубиновый лазер**, презентация которого состоялась в Нью-Йорке [8, 9]. Публике был представлен сантиметровый рубиновый стерженек с посеребренными торцами и пристроенной к нему лампой-вспышкой. ...А в конце 1960 г. состоялось и другое важное событие — Али Джаван, ученик Таунса, используя смесь гелия с неоном, создал **газовый лазер** непрерывного действия с высокой степенью когерентности излучения [10]. ...У нас в стране рубиновый лазер создали в 1961 г. — на первенство претендуют ФИАН (*Физический институт Академии наук. — Авт.*) и Государственный оптический институт (ГОИ)» [7].

Как видим, *спустя ровно 100 лет* с момента создания Ж. Сваном рабочей модели электрической лампы, появился новый мощный источник световой энергии, питающийся от электричества, и на много порядков превосходящий электрическую лампу по плотности и мощности генерируемого излучения.

1.2. Создание боевых лазеров — сверхмощных источников ЭМИ в оптической области спектра

«Естественно, что почти сразу лазер как потенциальное «абсолютное оружие» («гиперболоид инженера Гарина») стал средством давления на го-

сударство... с целью финансирования фантастических лазерных проектов систем противоракетной обороны (ПРО). Генералы и ученые действовали солидарно, сложившийся во время войны военно-промышленно-академический комплекс (выражение сенатора Дж. Фулбрайта) с годами упрочивался и становился ненасытнее. Тенденция общая для «них» и для «нас», вне зависимости от различия господствующих политико-социальных идеологий» [7].

Поясним на примере нашей страны, что подразумевают авторы [7] под «фантастическими лазерными проектами», для чего воспользуемся данными [11]. «Еще в 1962 г. специалисты ОКБ «Вымпел», головной организации СССР по созданию системы ПРО, рассматривали возможности создания **лазерного локатора** для выполнения отдельных функций в системе ПРО, в частности высокоточного определения координат цели. ...Несколько позже при непосредственном участии Н. Г. Басова ...начала изучаться возможность **поражения ГЧБР лазерным лучом** (ГЧБР — *головная часть баллистической ракеты*. — *Авт.*). Оценки показывали, что для этого потребуются создать лазеры с предельно высокой энергией излучения (на много порядков больше, чем в лазерном локаторе)... Для решения задач в интересах ПРО были нужны лазеры с энергией в импульсе, превышающей достигнутую в 1963–1964 гг. энергию — **для лазерной локации в сотни раз, а для поражения ГЧБР — в десятки миллионов (!) раз**. С самого начала в коллективе Басова понимали, что шансов на поражение ГЧБР тепловыми эффектами, вызываемыми нагревом лазерным излучением, мало. О.Н. Крохин (*сотрудник Н. Г. Басова, ныне академик, зам. директора ФИАН*. — *Авт.*) предложил использовать для этого механический импульс отдачи, возникающий при быстром испарении внешнего слоя теплозащитной оболочки ГЧБР под воздействием лазерного излучения высокой интенсивности..., возможность такого способа поражения в те годы не вызывала сомнений».

«Решение о создании на Балхашском противоракетном полигоне (*Сары-Шаган*. — *Авт.*) экспериментального (*лазерного*) локатора ЛЭ-1 для определения координат ГЧБР на дальностях до 400 км (рис. 5) было утверждено в сентябре 1963 г. ...Выбор структуры локатора определило реальное состояние работ по лазерам на рубине, достижимые параметры которых на практике оказались значительно ниже первоначально предполагавшихся: средняя мощность одного лазера вместо ожидавшихся 1000 Вт составила в те годы примерно 10 Вт. Опыты, проведенные... в ФИАНе, показали, что наращивание мощности путем последовательного усиления лазерного сигнала в цепочке лазерных усилителей... возможно лишь

до определенного уровня. Слишком мощное лазерное излучение разрушало сами лазерные кристаллы. ...В связи с этим пришлось установить в локаторе не 1, а 192 поочередно работающих лазера с энергией в импульсе 1 Дж. Общая средняя мощность многоканального лазерного передатчика локатора была около 2 кВт» [11].

В решение задачи создания лазерной системы ПРО в СССР были вовлечены многие организации и предприятия, специализирующиеся в области лазерной техники и оптики: Государственный оптический институт (ГОИ) им. С. И. Вавилова, ЦКБ «Геофизика», Ленинградское оптико-механическое объединение (ЛОМО), ЦКБ «Луч», преобразованное позже в ЦКБ «Астрофизика», ВНИИЭФ, известный также как Арзамас-16 (ныне — Российский федеральный ядерный центр РФЯЦ в Сарове), Институт химической физики АН СССР, филиал Института атомной энергии им И. В. Курчатова в г. Троицке (ныне ГНЦ РФ ТРИНИТИ — Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований), НПО «Алмаз», ОКБ «Радуга» (испытательный лазерный центр (полигон) во Владимирской области) и др. Научное руководство осуществлял ФИАН.

«В 1975 г. была достигнута более или менее уверенная работа локатора по самолету на дальности около 100 км. Разработчики приступили к испытаниям локатора по ГЧБР, а также искусственным спутникам Земли. Однако **локатор, естественно, не обеспечивал работу в условиях облачности**, поэтому его непосредственное использование в системе (*всепогодной*. — *Авт.*) ПРО было невозможным. В 1980 г. постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР локатор ЛЭ-1 по результатам испытаний был принят как средство для точных траекторных измерений на Балхашском полигоне. Вопреки утверждениям в иностранной печати, работы локатора по пилотируемым космическим аппаратам и станциям, как по советским, так и по американским, были весьма ограничены и практически запрещены» [11].

Далее в [11] описана история попытки создать поражающее лазерное оружие для ПРО на основе

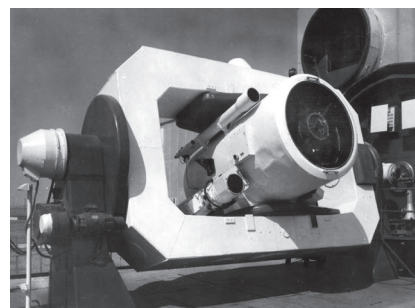


Рис. 5. Телескоп лазерного локатора ЛЭ-1

фотодиссационных йодных лазеров (ФДЛ). «Физическая идея, лежащая в основе ФДЛ, была предложена и опубликована учеными ФИАНа С. Г. Раутианом и И. И. Собельманом еще в 1961 г. [12]. Как было установлено позже, наиболее эффективными рабочими средами для таких лазеров оказались возбужденные атомы йода, образующиеся в ходе фотодиссоциации различных соединений, в первую очередь перфторалкилиодидов (например, CF_2I и $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$). Их особенность состоит в наличии интенсивной полосы поглощения оптического излучения накачки в УФ-области. Такое излучение эффективно генерируется газовой плазмой с температурой порядка 25000 К. Рассматривалась идея использовать для этой цели **световое излучение ядерного взрыва** в воздухе, но наиболее существенной для практической реализации мощных ФДЛ оказалась оригинальная идея ученых из ФИАНа и ВНИИЭФ, открыто опубликованная лишь в начале 1990-х годов [13, 14]. Басов и Крохин предложили использовать для накачки ФДЛ **мощное световое излучение ударной волны в тяжелом газе, создаваемой взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ).** Создание ФДЛ с накачкой УФ-излучением фронта ударной волны потребовало преодоления определенного стереотипа мышления: многим казалась дикой сама идея «взрывающегося» лазера...

Программа работ по созданию лазерной стрельбовой установки для задач ПРО была утверждена решением правительства в 1966 г. Предусматривались разработка высокоэнергетических ФДЛ с энергией более 1 МДж (*мегаджоуля (!).* – Авт.) и создание на их основе на Балхашском полигоне научно-экспериментального стрельбового лазерного комплекса (НЭК), на котором идеи лазерной системы для ПРО должны быть проверены в натуральных условиях. Программа получила шифр «Терра-3».

В [11] довольно подробно описан комплекс проблем, возникших при реализации программы «Терра-3». Основная проблема заключалась в крайне высокой стоимости первых образцов ФДЛ и оптики к ним, *которые разрушались при каждом эксперименте.* Начались работы по ФДЛ многократного использования с источниками накачки на основе мощного электрического разряда. К концу 1960-х годов была достигнута энергия ФДЛ около 1000 Дж в импульсе. Однако выяснилось, что эти лазеры не позволяли получить требуемый от них узкий пучок излучения из-за возникавших в лазерах оптических неоднородностей. Для решения проблемы была предложена двухкаскадная схема лазерной установки, в которой излучение многих ФДЛ 1-го каскада с «плохой» расходимостью направлялось в лазер-преобразователь (ВКР-лазер) 2-го каскада с «хорошей» расходимостью.

Было решено, что НЭК «Терра-3» будет состоять из йодных взрывных ФДЛ, ВКР-лазера (сумматора) на жидком кислороде, системы наведения излучения и аппаратуры управления комплексом. Для точного наведения мощного лазерного пучка на цель применялась система так называемого «оптического нониуса» на основе вращающихся зеркальных клиньев. Высокоточные приводы и безлюфтовые редукторы для опорно-поворотных устройств разрабатывались в ЦНИИ автоматики и гидравлики с участием ученых МВТУ им. Н. Э. Баумана.

В начале 1970-х годов были испытаны экспериментальные взрывные лазеры с энергией до 1 МДж и началась подготовка к выпуску серийных лазеров ФО-21 (ЦКБ «Луч») и Ф-1200 (ВНИИЭФ). Однако ко второй половине 1970-х годов выяснилось, что у создателей НЭК не было лазерного пучка такой мощности, какая требовалась для поражения ГЧБР. «Параллельно выполняемые по инициативе Н. Г. Басова исследования в области лазеров других типов (*лазеров на CO_2 , химических лазеров и газодинамических лазеров.* — Авт.) хотя и привели к значительному улучшению энергетических характеристик этих лазеров, однако, как и в случае взрывных ФДЛ, не дали результатов, которые позволяли бы ожидать, что ГЧБР можно поразить лазерным излучением в близкой перспективе и при разумных затратах. Работы велись уже более 10 лет, а создание лазерной системы ПРО отодвигалось все дальше и дальше. Ощущение тупиковости работы (в смысле создания оружия для ПРО) постепенно проникало не только в умы разработчиков, но и становилось понятным начальству. Кроме того, за эти годы в стране был достигнут значительный прогресс в создании ракетных систем ПРО, актуальность лазерной системы существенно уменьшилась. В Министерстве оборонной промышленности и в ВПК в начале 1978 г. было подготовлено постановление правительства, которое должно было «перевести стрелки» с нерешенной проблемы на иную насущную задачу обороны страны. Предусматривалось использовать для решения новой задачи основную часть технических достижений в области мощных лазеров, полученных в ходе работ по программе «Терра-3». Реализации решения способствовало то обстоятельство, что еще в начале 1970-х годов в ЦКБ «Луч» начались работы **по другим направлениям оборонного и гражданского применения лазеров.** В 1978 г. с согласия Министерства обороны СССР программа была закрыта» [11]. Подводя итоги работ по программе «Терра-3», авторы [11] приходят к следующему выводу: «Итогом программы был колоссальный подъем как научного, так и технического уровня исследований и разработок высокоэнергетических лазеров в СССР. Достигнутые в конце 1960-х —



Рис. 6. Лазерный самоходный комплекс 1К17 «Сжатие»

середине 1970-х годов **энергетические характеристики не превзойдены до сих пор».**

В качестве примера «других направлений оборонных применений лазеров» можно привести самоходный лазерный комплекс 1К17 «Сжатие», разработанный в ЦКБ «Астрофизика» (рис. 6). Комплекс 1К17 был предназначен для подавления электронно-оптических систем наблюдения и управления оружием поля боя в жестких климатических и эксплуатационных условиях, предъявляемых к бронетехнике. В 1992 г. комплекс «Сжатие» был даже принят на вооружение, но выпущено всего несколько экземпляров. Производство прекратили из-за сокращения финансирования «оборонки».

«Сжатие» представлял собой лазерный комплекс с автоматическим поиском и наведением на бликующий объект излучения многоканального лазера на кристалле рубина. Специально для «Сжатия» был выращен искусственный кристалл массой около 30 кг — «лазерная пушка» в этом смысле влетела «в копеечку». Установка требовала большого количества энергии. Для ее питания использовались мощные генераторы, приводимые в действие автономной вспомогательной силовой установкой (ВСУ).

Материалы, относящиеся к проекту «Терра-3», к комплексу 1К17 и другим проектам, упоминаемым далее, были рассекречены и появились в открытой печати всего несколько лет назад. Из этих материалов следует, что комплекс 1К17 «Сжатие» был наземным прототипом лазерного комплекса космического базирования. Планировалось создать космический аппарат тяжелого класса 17Ф19С «Скиф-Стилет», рассчитанный на запуск с помощью ракеты-носителя «Энергия». На этом аппарате предполагали установить бортовой специальный лазерный комплекс 1К11 «Стилет», аналог лазерного комплекса, примененного в 1К17 «Сжатие». «Стилет» для 17Ф19С представлял собой 10-ствольную установку, состоящую из ИК-лазеров, работающих на длине волны 1,06 мкм. Космический «Стилет» предполагалось применять как противоспутниковое оружие, ведь выход из строя оптико-электронных систем космического аппарата

противника был равносильна его гибели. Для повышения эффективности действия «Стилета» в космосе был разработан специальный телескоп. В сентябре 1986 г. действующий макет «Стилета» был изготовлен НПО «Астрофизика».

Следует заметить, что с 1983 г. в США начались работы по программе так называемой «стратегической оборонной инициативы» (СОИ) — Strategic Defense Initiative — долгосрочной программе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, основной целью которой было создание широкомащтабной системы ПРО с элементами космического базирования. В качестве одной из основных составляющих космического сегмента СОИ предполагалось использовать космические платформы с размещенными на них поражающими лазерными системами. Упомянутый выше космический аппарат 17Ф19С «Скиф-Стилет» с лазерным комплексом 1К11 «Стилет» был ничем иным, как элементом ответной «советской СОИ».

Еще одним примером советского ответа на американскую СОИ стала «летающая лазерная пушка» (рис. 7).

Создание советского боевого лазерного комплекса авиационного базирования (ЛКАБ) началось в середине 1970-х годов. Головным разработчиком стал Таганрогский машиностроительный завод (ТМЗ, с 1989 г. ТАНТК имени Г.М. Бериева), который после свертывания основных работ по гидроавиации переориентировали на создание авиационных комплексов специального назначения. Основным назначением ЛКАБ был вывод из строя американских низкоорбитальных искусственных спутников военного назначения, в первую очередь спутников оптической разведки серии КН. Экспериментальный ЛКАБ получил обозначение «А-60». В качестве базы для него использован транспортный самолет Ил-76МД. В ряде публикаций утверждается, что А-60 представляет



Рис. 7. Лазерный комплекс авиационного базирования А-60 на базе Ил-76МД

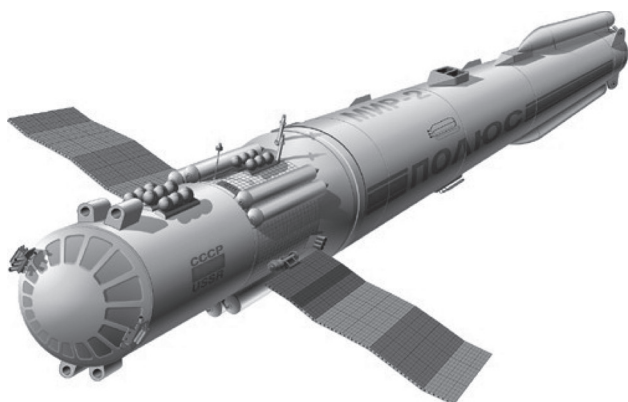


Рис. 8. Космический аппарат «Полюс» – 17Ф19Д «Скиф-Д»

собой авиационный вариант носителя мегаваттного лазера, планировавшегося к выведению в космос на космическом аппарате 17Ф19Д «Скиф-Д».

Разработчиками лазерной системы стали ЦКБ «Алмаз» (ныне входит в состав концерна «Алмаз-Антей») и КБ химической автоматики. В А-60 используется «углекислотный газодинамический лазер ГДЛ РД0600, мощность которого, по разным данным, составляла от 100 кВт до 1 МВт» [15]. В [15] утверждается, что комплекс А-60 «предназначен для исследования возможностей лазера по поражению ракет в стратосфере. По итогам его испытаний было принято решение о целесообразности установки лазерной системы такого типа на космический аппарат «Полюс» (рис. 8). Боевой лазер был очень компактным: длиной менее 2,5 м. Большую часть запущенного в космос весогабаритного макета «Полюса» занимал электрогенератор, вырабатывающий уйму электроэнергии. После первого неудачного запуска в 1987 г. проект не получил продолжения» [15].

В 1977 г. на ТМЗ началось создание первого прототипа А-60 — летающей лаборатории — «изделие 1А» — для отработки основных технических решений комплекса. На базовом самолете Ил-76МД (борт «СССР-86879»), предназначенном для создания летающей лаборатории, были проведены глубокие доработки. В носовой части вместо штатного метеорадара установлен «бульбообразный обтекатель» (рис. 7) со «специальной аппаратурой» (РЛС обнаружения и наведения и лазерная система наведения). По бокам фюзеляжа под обтекателями были установлены два турбогенератора АИ-24ВТ мощностью 2,1 МВт, обеспечивающие работу лазерного комплекса. Сама лазерная установка была выполнена с убирающейся оптической головкой в отсеке с раздвижными створками, размещенными в верхней центральной части фюзеляжа.

Впервые летающая лаборатория 1А поднялась в воздух 19 августа 1981 г. ЛКАБ был смонтирован

на самолете в 1983 г. Огневые испытания лазерного комплекса с борта 1А начались в 1984 г. Известно, что было выполнено несколько десятков стрельб по цели (стратосферный аэростат), находящейся на высоте 30–40 км. Кроме того, выполнялись стрельбы по воздушной мишени — самолету Ла-17.

В США также были предприняты попытки создать летающую лазерную пушку. «На рубеже 1970–1980-х гг. был создан и испытан комплекс ALL с газодинамическим CO₂ лазером мощностью 400 кВт, размещенным на самолете KC-135. При испытаниях комплекса ALL в условиях реального полета были сбиты несколько ракет класса «воздух-воздух» «Сайдвиндер» и крылатая ракета BQM-31» [16].

«После распада Советского Союза США, как известно, отказались от амбициозного и дорогостоящего проекта СОИ и размещения лазерного оружия в космосе. Но не отказались от разработки лазерного комплекса авиационного базирования (ABL) (*Airborne Laser. — Avm.*), также решающего задачи воздушно-космической обороны. Создание группировки этих комплексов может привести к нарушению и без того пошатнувшегося равновесия стратегических сил сдерживания между США и Россией» [16].

«В США в настоящее время, по имеющейся информации, наиболее «продвинутым» представителем лазерного оружия является разрабатываемый ЛКАБ ABL (*Boeing YAL-1, рис. 9*). Военно-техническая целесообразность его создания на этапе принятия решения о разработке обосновывалась тем, что обеспечить надежную защиту своей территории и территории союзников от баллистических ракет (БР) можно путем их перехвата на разгонном участке траектории» [16].

«Как показали многочисленные эксперименты американских специалистов, воздействие мощного лазерного излучения на элементы конструкций баллистических ракет может эффективно нагревать и разрушать оболочки топливных отсеков, что приводит к потере их работоспособности и взрыву. Нагруженный корпус, а значит, и вся **БР наиболее уязвима для воздействия лазерного излучения именно**



Рис. 9. Лазерный комплекс авиационного базирования Boeing YAL-1

на разгонном участке траектории. Перехват БР на этом участке выгоден и тем, что мощный факел ракетного двигателя является надежным источником сигнала для оптических средств обнаружения, целеуказания и углового сопровождения ЛКАБ АВЛ.

ЛКАБ АВЛ относится к **сверхвысокоточному оружию направленной энергии**, решающему боевую задачу путем передачи энергии лазерного излучения на уязвимый элемент удаленной цели при пространственной стабилизации лазерного пучка. В состав комплекса входят самолет-носитель (Боинг-747-400), мощный лазер, система обнаружения, система наведения излучения, система управления и другие элементы. Размещение лазерного комплекса на тяжелом самолете-носителе позволяет применить мощный лазер с запасом расходимости компонентов, обеспечивающих необходимый энергетический боезапас; применить крупноапертурный выходной телескоп для снижения ограничений, связанных с дифракционным пределом по угловой расходимости мощного излучения (см. рис. 9); реализовать большой сектор обслуживания целей, который с учетом разворота самолета-носителя обеспечивает работу в пределах всей верхней полусферы.

Поражающим компонентом ЛКАБ АВЛ является **йодно-кислородный химический лазер с длиной волны излучения 1,315 мкм**. Лазер выполняется по модульному принципу с наращиванием количества (модулей. — Авт.) от 6 до 14. Общая мощность излучения 14 охваченных единой оптической схемой модулей составляет **несколько мегаватт**. Средства обнаружения — пассивные инфракрасные датчики кругового обзора, лазерный дальномер (длина волны излучения 1,15 мкм), система точного наведения и распознавания цели на основе импульсно-периодического лазера ($\lambda = 1,03$ мкм), система оценки параметров атмосферы на основе импульсно-периодического лазера ($\lambda = 1,06$ мкм). Средства наведения поражающего излучения — выводной телескоп с главным зеркалом общим эффективным диаметром 1,5 м. Выводной телескоп размещен в носовой части самолета (рис. 9), что дает возможность ориентации излучения от пригоризонтных до призенитных направлений. Зеркала телескопа выводной турельной установки закрыты оптически прозрачным для рабочего излучения обтекателем. Для компенсации искажений в оптическом тракте мощного излучения, включая трассу распространения до цели, предусмотрена система адаптивной оптики» [16].

Американские специалисты при предварительных расчетах предполагали получить выходную мощность ЛКАБ АВЛ 3 МВт и угол расходимости пучка излучения 1,2 дифракционного предела. «Эф-

фективная сила излучения ЛКАБ АВЛ при указанной выходной мощности и равновесном вкладе угловой расходимости и ошибок угловой стабилизации излучения оценивается величиной $1,19 \cdot 10^{18}$ Дж/(срад·с). Это примерно в 3 раза меньше предела физической реализуемости, составляющего при указанных значениях параметров АВЛ величину $3,44 \cdot 10^{18}$ Дж/(срад·с)» [16].

«Научно-технический задел по созданию (ПРО) на основе мощных лазеров нарабатывается в США уже четыре десятилетия. Достигнутый уровень концентрации излучения при испытаниях АВЛ можно оценить величиной 10^{13} Дж/(срад·с). Продемонстрированный в натурных испытаниях комплекса с лазером «Миракл» и комплекса «Наутилус» технологический уровень США 1990-х годов в области создания АВЛ с мощными лазерами можно оценить величиной в пределах 10^{14} – 10^{15} Дж/(срад·с). Поэтому технический риск создания ЛКАБ АВЛ с заданными характеристиками в заданные сроки оценивается как весьма высокий. Американские специалисты считают, что возможности ЛКАБ АВЛ по передаче энергии лазерного излучения позволят **на расстоянии до нескольких сотен километров осуществлять эффективный перехват баллистических ракет любого типа**. Комплекс АВЛ рассчитан на боезапас (общее время излучения за самолетовылет) до 150–200 секунд с возможностью генерации излучения порциями («выстрелами»)» [16].

«Помимо решения основной задачи по перехвату баллистических ракет на активном участке траектории, возможны дополнительные направления использования ЛКАБ АВЛ, осуществляемые при значительно меньших значениях силы излучения. В качестве дополнительной задачи весьма вероятна ориентация АВЛ на решение задачи противоспутниковой борьбы. При этом существенно (на порядок величины) возрастает располагаемое время передачи энергии на цель. В среднем снижаются потребные критериальные значения плотности энергии излучения из-за наличия на космическом аппарате многих уязвимых мест, открытых для излучения. Значительно снижается негативное влияние атмосферного участка распространения излучения, так как трассы будут призенитными. Перехват может осуществляться над своей территорией или вблизи, что не требует дорогостоящих мероприятий по охране, дозаправке и техническому обслуживанию АВЛ за рубежом. Работы по созданию ЛКАБ АВЛ ведутся в США с 1996 г. Но высокий технический риск привел к увеличению примерно на шесть лет сроков и финансовых затрат на создание ЛКАБ АВЛ. По заявлению директора Агентства по ПРО от 21 февраля 2008 г., монтаж на борту ЛКАБ АВЛ мощного лазера

уже завершен. Комплексные испытания ЛКАБ АВЛ (были) намечены на 2009 г. **А ввод в строй группировки ЛКАБ АВЛ США (до 7 единиц) планировался после 2015 г.**

По мнению командования ВВС США, ЛКАБ АВЛ будут нести дежурство в позиционных районах патрулирования Мирового океана подводными лодками морских стратегических ядерных сил и на безопасном удалении (до 100 км) от линии соприкосновения войск потенциальных противников, имеющих баллистические ракеты наземного базирования. Возможности самолета-носителя комплекса АВЛ: максимальный потолок — 15 км, время нахождения в воздухе — 16 часов (с дозаправкой — значительно больше), скорость полета — около 900 км/ч.

Из всего этого следует (*главный вывод*), что группировка ЛКАБ может существенно изменить сложившийся баланс стратегических сил сдерживания США и России. Лазерные комплексы авиационного базирования АВЛ могут сорвать выполнение боевых задач морскими и авиационными стратегическими ядерными силами и будут опасны для шахтных и мобильных ракетных комплексов России, дислоцированных в приграничных районах. Конечно, Россия не должна позволить втянуть себя в новую гонку вооружений, как когда-то это произошло с СССР. Любые шаги в этом направлении должны тщательно просчитываться и анализироваться. Но и **не замечать того, что лазерное оружие уже поднимается над землей, а в ближайшее время способно будет решать стратегические задачи, мы, думаем, также не можем** [16].

«Российские ученые ведут работу по созданию боевого лазера, предназначенного для установки на самолеты. Об этом сообщает (*агентство*) «Интерфакс» со ссылкой на действительного академического советника Академии инженерных наук России Юрия Зайцева. При этом Ю.Зайцев, комментируя аналогичные разработки американской корпорации Boeing, подчеркнул, что Россия не втягивается в новую гонку вооружений. По его словам, в программе вооружений, которая была одобрена Научно-техническим советом Военно-промышленной комиссии (ВПК), есть разделы, предполагающие проведение работ по разработке лазерного оружия. По сведениям СМИ, разработка и испытания **кислородно-йодной лазерной пушки COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser)** проводятся американскими корпорациями Boeing и Northrop Grumman совместно с Агентством по противоракетной обороне США (U.S. Missile Defense Agency). В 2008 г. представитель Northrop Grumman заявил, что в ближайшее время пройдут боевые испытания лазера, способного уничтожить в воздухе любую баллистическую ракету» [17].

Действительно, в 2009 г. при испытаниях лазерного комплекса Boeing YAL-1 «впервые были достигнуты результаты по поражению головных частей реальных ракет на жидком и твердом топливе при дальности до движущейся цели 80 км» [15]. Однако в публикации 2012 г. [15] утверждается: «Boeing YAL-1, способный сбивать ракеты лазерным пучком, в 2012 г. отправится на консервацию. Окончательное решение об отказе от дальнейшего финансирования программы недавно было зафиксировано в годовом бюджете США. У Пентагона в очередной раз не хватило средств на продолжение очередного чрезвычайно амбициозного проекта».

В России уже несколько лет ведется финансирование работ по расконсервации и модернизации комплекса А-60. «Улучшение финансирования Вооруженных сил России в последние годы позволило вернуться к ряду амбициозных советских военных программ, в число которых вошла и А-60. Определенным стимулом к этому послужило и продолжение работ в США над боевым лазером воздушного базирования Boeing YAL-1. По имеющимся данным, решение о возобновлении работ над А-60 было принято в 2005 г., и комплекс был включен в Государственные программы вооружений на 2007–2015, а затем и на 2011–2020 гг. В последние несколько лет ТАНТК получал весьма обширное финансирование по программе А-60» [16].

В [18] утверждается: «Финансирование лазерных разработок в интересах Минобороны России возобновилось в 2012 г. Теперь на А-60 планируется установить более мощный аппарат. Имеются в виду новые блоки установки 1ЛК222, разработанной «Химпромавтоматикой». Ее испытания планировались на 2013 г., но сначала носитель должен пройти модернизацию. В военном ведомстве пока не определились, на какие типы самолетов ставить боевые лазеры. Вероятно, это будут военно-транспортные самолеты и бомбардировщики».

Приведем еще одну выдержку из материалов, опубликованных в [19] в 2012 г. «...Подписан указ об образовании Фонда перспективных исследований (ФПИ). Целью этой организации является содействие различным научным работам оборонного назначения, которые требуют серьезной государственной поддержки. Согласно некоторым источникам, в ближайшем будущем ФПИ придет на смену ВПК ...и возьмет на себя ее функции. Большинство подробностей о работе новой организации пока еще не стало достоянием общественности, однако уже появились сообщения о возможных проектах, которыми она займется. «Известия» со ссылкой на источник в оборонной промышленности сообщают, что в следующем году

(в 2014 г. — Авт.) будет возобновлена программа исследования и создания боевых лазеров. К научной и конструкторской работе будут привлечены концерн «Алмаз-Антей», ТАНТК им. Г.М. Бериева и компания «Химпромавтоматика». Сообщается, что министерство обороны уже выработало свою версию облика будущего лазерного оружия и передало соответствующую документацию занятым в проекте организациям. Будущие работы направлены на создание полноценной боевой системы, способной уничтожать различные цели. Очевидно, все исследования будут идти под эгидой ФПИ.

Как видим, в России начинает возрождаться широкомасштабная программа создания современного мощного лазерного оружия, что означает вовлечение в решение этой задачи многих предприятий и организаций, занимающихся лазерной тематикой. Это в свою очередь означает, что *становится вновь востребованной работа по обеспечению безопасности людей на «лазерных» предприятиях, т.е. дальнейшего развития системы лазерной безопасности на базе модернизированной традиционной отечественной системы ЛБ.*

Сравнительно недавно появились публикации о том, что в США разработан новый мощный лазер военного назначения, представляющий собой твердотельный волоконный лазер с диодной накачкой (рис. 10). «Компания Northrop Grumman анонсировала выпуск нового твердотельного электрического лазера мощностью более 105 кВт. Несмотря на то, что многие практические задачи при применении боевого лазерного оружия вполне достижимы при мощности 25–50 кВт, впервые на практике преодолен барьер 100 кВт, который традиционно считался принципиальным рубежом для достижения «оружейного» уровня мощности высокоэнергетических лазеров. В качестве отдельных блоков системы применяются «цепочки лазерных усилителей», каждая



Рис. 10. Твердотельный лазер компании Northrop Grumman с мощностью излучения 100 кВт

из которых генерирует луч мощностью порядка 15 кВт. В результате объединения семи лазерных цепочек получается установка с *пучком* суммарной мощности 105,5 кВт. Рекордная мощность лазерной установки зарегистрирована во время финальной демонстрации системы в рамках третьей фазы военной программы США по разработке мощных твердотельных лазеров (JHPSSL, Joint High Power Solid State Laser, Phase 3). В список зарегистрированных достижений входит достижение полной мощности за время 0,6 секунды и продолжительная работа системы на протяжении более 5 минут с электрооптической эффективностью на уровне 19,3% ... Помимо этого, при тестировании лазер также продемонстрировал максимальную продолжительность работы в течение более 85 минут при мощности более 100 кВт» [20].

«Основным плюсом своей разработки руководители проекта называют его блочную конструкцию, обеспечивающую гибкую масштабируемость системы. В пресс-релизе подчёркивается, что в стенах компании на практике уже испытана система с 8 лазерными цепями суммарной мощностью до 120 кВт. Твердотельный лазер Northrop Grumman будет применяться для создания боевых систем защиты и противоракетных систем воздушного, морского и наземного базирования. Судя по габаритам, такая система также вполне может базироваться на борту самолёта» [20].

Добавим, что для такого лазера не нужно «возить» запас рабочей смеси и огромное количество ракетного топлива, обеспечивающего работу систем накачки химического лазера типа СОИЛ или ГДЛ РД0600. Возможность применения подобного лазера в комплексах ЛКАБ выглядит крайне заманчиво, и вполне возможно, что уже в ближайшие годы появится информация о возобновлении в США испытаний ЛКАБ АВЛ, работающего на лазерах, показанных на рис. 10.

1.3. Мощные лазерные установки гражданского назначения для работы на открытых пространствах

В 1994 г. Н. Г.Басов, отвечая на вопрос об итогах лазерной программы «Терра-3» и констатируя, что «отрицательный результат — это тоже результат», сказал: «Мы твердо установили, что никто не сможет сбить боеголовку БР лазерным пучком, и лазеры мы здорово продвинули!». Действительно, накопленный в 1970–1990-е годы опыт разработки мощных лазеров для военных целей позволил создать современные виды мощной лазерной техники гражданского назначения, прежде всего лазерные технологические установки (ЛТУ) (рис. 11) и медицинские лазерные аппараты для лазерной хирургии.

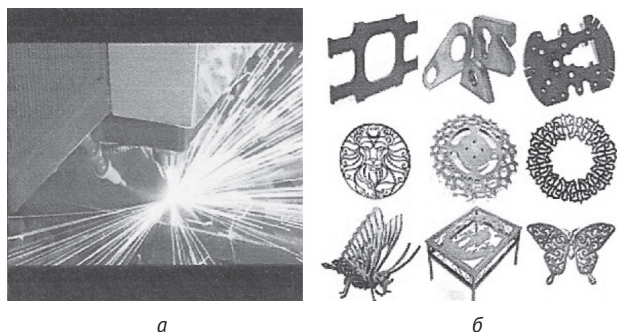


Рис. 11. ЛТУ для лазерной резки по металлу: а – ЛТУ в процессе резки; б – изделия, изготовленные методом лазерной резки

Указанные виды лазерной техники широко известны и описаны в различных научно-технических публикациях. Значительно меньше внимания уделено мощным лазерным комплексам, способным решать различные технические задачи на больших дистанциях воздействия лазерного пучка. Приведем пример разработки такого лазерного комплекса, работающего на открытых пространствах (ОТПР).

В начале 1990-х годов в ГНЦ РФ ТРИНИТИ родилась идея и началась разработка семейства мобильных лазерных технологических комплексов (МЛТК) на базе мощных газоразрядных CO_2 -лазеров. Представлялось перспективным их применение при проведении аварийно-восстановительных и демонтажных работ в атомной промышленности, газонефтяной и других отраслях при техногенных, природных и экологических катастрофах, когда приближаться к объекту, на который необходимо воздействовать, затруднительно или даже опасно [21].

МЛТК используются, когда объект воздействия невозможно переместить к лазеру. Например, дистанционная сварка магистральных трубопроводов с толщиной стенки до 20 мм; очистка загрязненных по-

верхностей, в том числе дезактивация; дистанционная разделка конструкций и оборудования (металл, бетон, кирпич и т.п.) при утилизации и ликвидации последствий техногенных катастроф, в том числе под высоким напряжением и при повышенном радиационном фоне; участие в антитеррористических мероприятиях (дистанционное разминирование; защита гражданских судов от захвата пиратами и т.п.), удаление сосулек с крыш зданий, морских причалов и т.д.

Созданный в 2010 г. мобильный лазерный технологический комплекс МЛТК-20 (рис. 12) является новейшей разработкой ГНЦ РФ ТРИНИТИ и ООО «Газпром газобезопасность» совместно с ООО «НТО «ИРЭ-Полюс», ООО НПО «Этан-промгаз», ООО НПЦ «Система», Оптико-физической лабораторией ГОИ им. С. И. Вавилова и другими российскими организациями» [21].

Оборудование комплекса размещается в 4 блоках-контейнерах (рис. 12а). Вес каждого блока не превышает 2 т. Первый, второй и третий блок-контейнеры (с габаритами 2,4×2,4×2,4 м) идентичны по составу оборудования, управлению и функционированию. В каждом из них смонтирован лазерный блок ЛС-20 мощностью ИК излучения ($\lambda = 1,07$ мкм) (иттербиевый волоконный лазер. — Авт.) $P = 8$ кВт с соответствующей системой охлаждения. Потребляемая электрическая мощность каждого блока не превышает 32 кВт. От каждого из этих блоков лазерное излучение передается по оптоволоконному кабелю длиной до 90 м к четвертому блок-контейнеру. Такая схема позволяет использовать лазерные блоки как в составе комплекса МЛТК-20, так и по отдельности для различных коммерческих операций [21]. МЛТК-20 работает в непрерывном режиме и генерирует ЛИ суммарной мощностью **24 кВт с к.п.д. более 29%** [21].

«Конструкция блок-контейнера № 4 (левый блок на рис. 12а. — Авт.) с формирующим телескопом от-

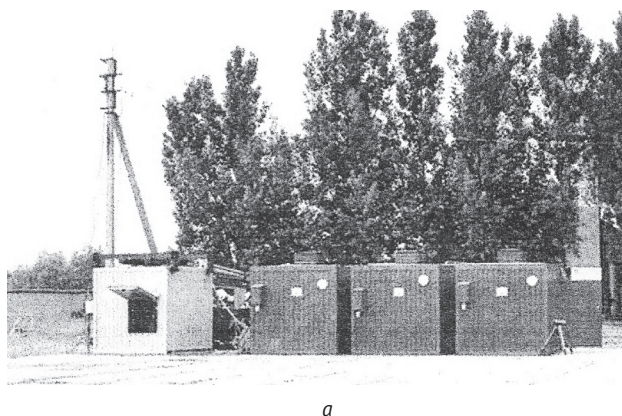


Рис. 12. Мобильный лазерный технологический комплекс МЛТК-20: а – комплекс МЛТК-20 на демонстрационной площадке; б – результат лазерной резки несущей конструкции буровой установки

личается несколько меньшими габаритами (2×2×2 м), но более прочным исполнением и наличием на передней стенке открываемого люка 0,9×0,9 м для вывода лазерного пучка. В четвертом блок-контейнере размещен трехканальный линзовый формирующий телескоп с системами наведения и наблюдения, управления положением луча и управления работой всего комплекса. Здесь же во время работы размещаются один или два оператора, которые наводят лазерный луч на заданную зону резки металлоконструкции, удаленную на расстояние до 70 м, а также контролируют по монитору процесс ведения резки. Энергопотребление этого блок-контейнера не превышает 10 кВт.

Конструкция блоков-контейнеров рассчитана на работу установленного в нем оборудования при температуре окружающей среды от (минус) 45°С до +45°С. **МЛТК-20 имеет сертификат соответствия Госстандарта России (в настоящее время в РФ официально не существует система сертификации лазерной техники, так как ТР ТС ЛБ находится в начальной стадии разработки. — Авт.).** Транспортировка МЛТК-20 может осуществляться всеми видами транспорта. Время разворачивания комплекса в полевых условиях — не более 0,5 часа» [21].

Далее в [21] указывается, что МЛТК-20 «прошел боевое крещение» в июле 2011 г. в Пуровском районе Ямало-Ненецкого АО. Там в результате нарушения технологии строительства скважины № 506 Западно-Таркосалинского нефтегазоконденсатного месторождения был допущен открытый газовый фонтан с возгоранием. С помощью МЛТК-20 удалось дистанционно срезать несущие опоры нефтяной вышки (рис. 12 б), что позволило завести над скважиной гасящую заглушку и устранить пламя. В заключение авторы публикации [21] утверждают, что появление высокоэффективных МЛТК с большой выходной мощностью открывает новые перспективы использования лазерной техники и лазерных технологий в различных отраслях.

Заметим, что из крайне скудного описания принципа действия лазерных блоков МЛТК-20 следует, что каждый из них по конструкции аналогичен твердотельному лазеру компании Northrop Grumman (рис. 10). Это говорит о том, что отечественные разработчики мощной лазерной техники «идут вполне в ногу» с конструкторами ведущей американской компании, занимающейся разработкой самых передовых образцов лазеров. Для подтверждения приведем следующую информацию.

В еженедельнике «Аргументы и факты» опубликована статья «Без нас никак?! Лазеры и пуанты у нас лучшие!» [22], в которой в контексте обсуждения вводимых против РФ экономических санкций приведены сведения о современных образцах отечественной продукции, пользующейся повышенным спросом за рубежом. В [22] упомянуты «промышленные лазеры» производства НТО «ИРЭ-Полус». «Мощные волоконные лазеры производятся в России. Мы занимаем 80% мирового рынка», — сказали «АиФ» на предприятии. Конкурировать с нами не может никто».

1.4. Полупроводниковые лазеры — основа современной лазерной техники

В [7] представлена история отечественной лазерной техники. Уже к концу 1960-х годов «лазеры начали применяться в точном приборостроении, медицине, химической технологии и многих других областях, но оставалась и очень значительная недоиспользованная территория. Древнейшая идея использовать оптические сигналы в информатике обрела контуры технического проекта (*ещё*) в 1955 г. (Е. Лёбнер), хотя убогость тогдашних излучателей не столько утверждала его идею, сколько ее дискредитировала. Однако Слово — **оптоэлектронный прибор, оптоэлектроника** — было сказано. Дело оставалось за «малым»: **создать источник света под стать транзистору — миниатюрный, эффективный, надежный.** Таков (*был*) «социальный заказ» на полупроводниковый лазер» [7].

«Интерес к полупроводникам первым проявил еще в 1957 г. Н. Г. Басов и привлек к этому теоретиков Ю. М. Попова и О. Н. Крохина, а также экспериментаторов лаборатории Б. М. Вула (ФИАН. — Авт.). До 1961 г. появилось несколько заявочных статей, в которых сформулировано необходимое условие получения инверсии населенности — использование вырожденного полупроводника [23]».

Далее авторы [7] подробно рассматривают историю создания в США и СССР полупроводникового инжекционного лазера на основе арсенида галлия. Авторы пишут: «Потенциал отечественных ученых-лазерщиков был столь значителен и авторитет столь высок, что при создании специализированного отраслевого института квантовой электроники — НИИ-333 (ныне НИИ «Полус») в марте 1962 г. (фактически всего через полтора года (!) после публикации Т. Меймана) в нем было предусмотрено подразделение полупроводниковых лазеров. Ученые

¹ Барн (русское обозначение б, бн; международное b) — внесистемная единица измерения площади, используется в ядерной физике для измерения эффективного сечения ядерных реакций, а также квадрупольного момента. 1 барн численно равен $10^{-28} \text{ м}^2 = 10^{-24} \text{ см}^2 = 100 \text{ фм}^2$ (примерный размер атомного ядра).



Рис. 13. Лазерные изделия на основе ЛПД: а – «зеленая лазерная указка» ($\lambda = 532$ нм, $P = 200$ мВт); б – «синяя лазерная указка» LASER-1W-Blue ($\lambda = 455$ нм, $P = 1$ Вт); в – лазерный пистолет Макарова (модель «Рубин» ЛТ-110ПМ); г – «зеленый» лазерный прицел Sightmark Triple Duty ($\lambda = 532$ нм, $P = 5$ мВт); д – лазерный дальномер-рулетка Leica DISTO D8 ($\lambda = 650$ нм, $P = 1$ мВт)

ФИАНа уже тогда были уверены, что этот прибор вот-вот появится, и сумели вселить эту уверенность в министра электронной промышленности А. И. Шокина. А в 1963 г. на старейших полупроводниковых предприятиях НИИ-311 (ныне НПП «Сапфир») и заводе «Старт» началась НИР по созданию промышленного GaAs-лазера. Достаточно скоро обнаружилось, что «лазер Холла» (GaAs-лазер. — Авт.) обладает крайне низкими, с потребительской точки зрения, характеристиками: высоким порогом возбуждения, необходимостью охлаждения и импульсным режимом работы, низким КПД, высокой расходимостью светового луча, малым сроком службы, низкой надежностью.

Рассматривая историю разработки полупроводникового инжекционного лазера, свободного от указанных недостатков, авторы [7] показали, что наиболее перспективным оказался лазер на основе «гетероструктуры». У истоков создания отечественного гетеролазера стоял российский нобелевский лауреат Ж. И. Алферов [24]. «Гетеролазер стал единственным среди всех других разновидностей лазеров, который пошел в массовое производство и получил широчайшее применение в информатике и телекоммуникации (IT-технологии). Только благодаря гетеролазеру стали возможны волоконно-оптическая связь и оптические дисковые накопители» [7]. Имеются в виду системы записи и считывания информации с «лазерных дисков», например, CD и DVD-дисков. Далее все разновидности полупроводниковых лазеров мы будем называть «лазерные полупроводниковые диоды» (ЛПД).

В последние 15 лет благодаря использованию ЛПД лазерные изделия (ЛИЗ) вышли за пределы промышленных предприятий, научных и медицинских учреждений. Лазеры вошли в повседневную жизнь многих людей, иногда даже не подозревающих об их наличии в окружающей техносфере. ЛПД применяются в современной аудио- и видеоаппаратуре, в персональных компьютерах и волоконно-оптических линиях связи. У многих людей появились домашние лазерные видеопроекторы. Обычному потребителю стали доступны медицинские терапевтические лазерные приборы. В свободной продаже появились такие виды ЛИЗ, как мощные (рис. 13а) и весьма опасные сверхмощные (рис. 13б, 14) лазерные целеуказатели (ЛЦУ), называемые в быту «лазерными указками», лазерные макеты огнестрельного оружия (рис.13в), а также лазерные прицелы-целеуказатели для пневматического и охотничьего оружия (рис. 13г), лазерные дальномеры-рулетки (рис. 13д) и другие гаджеты с использованием ЛПД. Упомянутые ЛИЗ при неосторожном обращении могут представлять серьезную опасность для глаз как пользователей, так и окружающих людей. Особую опасность представляют сверхмощные ЛЦУ серии «Blaster» (рис. 14б), прежде всего из-за крайне высокой выходной мощности ЛИ, абсолютно не требующейся для обычных бытовых потребностей в указывании тех или иных удаленных объектов. Дополнительную опасность создает само название серии ЛЦУ, весьма привлекательное для молодого поколения, воспитанного на компьютерных играх. Само слово «Бластер», обо-

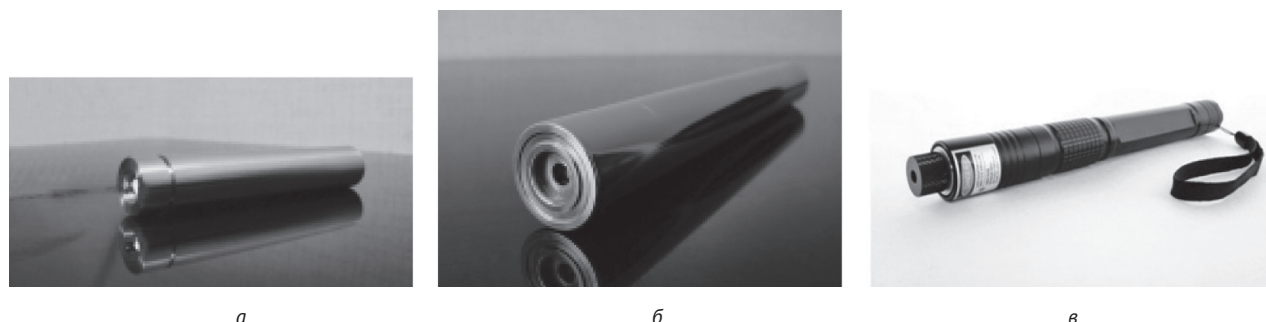


Рис. 14. Наиболее мощные лазерные целеуказатели гражданского назначения серий «Бластер», «Zver» (jlaser.ru): а – ЛЦУ типа Mini Blaster, P = 12 Вт; б – ЛЦУ типа Blaster Pro, P = 30 Вт; в – ЛЦУ типа Zver, P = 15 Вт

значущее излюбленное лучевое оружие героев различных «Звездных войн», выступает дополнительным рекламным стимулом для приобретения этих крайне опасных ЛИЗ.

В различных технических отраслях широко используются лазерные системы и устройства (ЛСУ), предназначенные для дистанционного измерения параметров и характеристик удаленных объектов, а также для передачи и приема информации (лазерные дальномеры и измерители скорости, лазерные теодолиты, системы мониторинга окружающей среды, системы беспроводной атмосферной связи и т.п.). В области индустрии развлечений появились различные лазерные аттракционы (лазерный тир и «лазертаг», заменивший вполне безобидный пейнтбол). Все чаще люди сталкиваются с уличной рекламой на основе лазерных видеопроекций, со световыми эффектами с использованием лазерного излучения при посещении театрально-зрелищных мероприятий и массовых лазерных шоу.

Во всех перечисленных выше видах ЛИЗ и ЛСУ сегодня используются ЛПД либо непосредственно в качестве источника основного излучения, либо в качестве источника излучения накачки для лазерных кристаллов. В последнем случае используется схема построения лазера по принципу, примененному еще в проекте «Терра-3» (см. раздел 1.2), а именно относительно мощное лазерное излучение ЛПД с «плохой расходимостью» используется для возбуждения генерации ЛИ с несколько меньшей мощностью, но с «хорошей расходимостью». Подобные системы называются «лазерами с диодной накачкой», или «DPSS лазерами». Типичная схема DPSS лазера, примененная в конструкциях мощных «зеленых лазерных указок», приведена на рис. 15.

На схеме (рис. 15) излучение ЛПД с длиной волны 808 нм с помощью фокусирующей линзы направляется на лазерный кристалл ортованадата иттрия с неодимовым легированием (Nd:YVO₄), где излучение с $\lambda = 808$ нм преобразуется в ЛИ с $\lambda = 1064$ нм.

Далее, после прохода через кристалл титанила-фосфата калия КTiOPO₄ (сокращенно — КТР), частота излучения удваивается, соответственно, длина волны 1064 нм уменьшается вдвое и становится равной 532 нм. Получается видимый зелёный свет. КПД схемы около 20%, большая часть потерь — на переходе 808→1064 нм. На «указках» с мощностью P > 50 мВт устанавливают инфракрасный ИК-фильтр, чтобы убрать остатки ИК-излучения.

Любые ЛИЗ и ЛСУ представляют собой продукцию повышенной опасности, связанной, прежде всего, со способностью лазерного излучения, генерируемого в спектральном диапазоне от 380 до 1400 нм, нанести непоправимый ущерб зрительному аппарату человека. Оптические среды (ОС) глаза (роговица, хрусталик, стекловидное тело) в этой области спектрального диапазона прозрачны для лазерного излучения, которое достигает сетчатки глаза. Излучение с длиной волн λ от 380 до 1400 нм (видимая и ближняя ИК-область спектра) проходит через ОС и поглощается сетчаткой, в отличие от излучений с $\lambda < 380$ (УФ-излучение) и $\lambda > 1400$ нм (среднее и дальнее ИК-излучение). Заметим, что ошибочно широко



Рис. 15. Схема «зеленой лазерной указки» ($\lambda = 532$ нм)

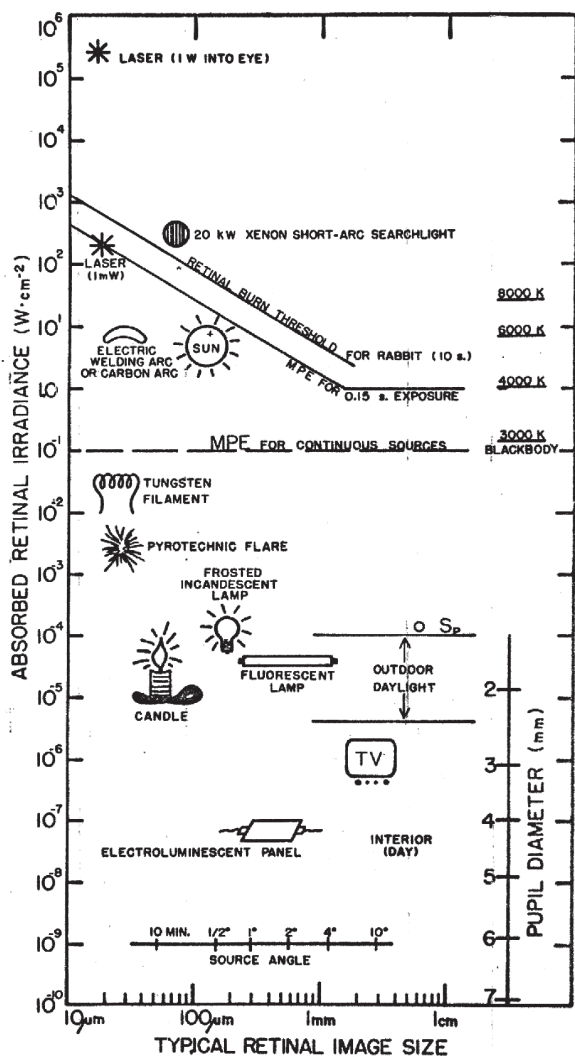


Рис. 16. Плотность мощности оптического излучения, поглощенной сетчаткой глаза, и размеры изображения на сетчатке при наблюдении различных источников излучения

распространено мнение, что невидимое глазом ЛИ, генерируемое в ближней ИК-области спектра (спектральный диапазон $750 < \lambda \leq 1400$ нм), безопасно для глаз. Очень опасно!

Лазерное излучение, генерируемое в видимой и ближней ИК-области спектра, попавшее в зрачок глаза, фокусируется на сетчатке в пятно чрезвычайно малых размеров (диаметром 10–20 мкм) с крайне высокой поверхностной плотностью ЛИ, что может привести к ожогу сетчатки даже при незначительной мощности ЛИ, попавшей в зрачок. На рис. 16 показана плотность мощности оптического излучения, по-

глощенной сетчаткой глаза («ABSORBED RETINAL IRRADIANCE»), измеряемой в Вт/см², и типичные размеры изображения на сетчатке («TYPICAL RETINAL IMAGE SIZE») глаза, облучаемого оптическим излучением различных искусственных и естественных источников [25].

Как мы видим, лазерный источник («LASER») создает на сетчатке глаза наименьшее по размерам изображение порядка 20 мкм. При этом плотность поглощенной мощности оптического излучения на сетчатке E_C (Вт/см²), создаваемая лазерным источником мощностью всего 1 мВт, значительно превосходит значение E_C , создаваемое при наблюдении солнечного диска («SUN»), а по отношению к источнику мощностью $P = 1$ Вт (1 W) можно смело утверждать: «Ярче тысячи солнц», как озаглавил Р. Юнг свою знаменитую книгу [26], написанную по следам атомного «Манхэттенского проекта», имея в виду яркость вспышки атомного взрыва (см. рис. 3). Кстати, если иметь в виду боевой лазер с мощностью излучения $P = 1$ МВт, то можно сказать: «Ярче миллиарда солнц».

Если не принимать в расчет запрещенные испытания термоядерных зарядов, то можно утверждать, что по критерию поражения глаз лазерное излучение является сегодня наиболее опасным видом ЭМИ, что требует применения надежной и эффективной системы обеспечения лазерной безопасности. Кроме того, рис. 16 наглядно демонстрирует, что излучение вполне доступной в настоящее время «лазерной указки» мощностью $P = 1$ Вт гарантированно приводит к разрушению сетчатки.

Более того, одновременное применение хотя бы десяти ЛЦУ, показанных на рис. 13б, лазерные пучки которых собраны вместе с помощью довольно простого оптического устройства, будет означать применение лазерного оружия ближнего радиуса действия с мощностью $P = 300$ Вт («ярче 300000 солнц»). Фокусировка такого пучка на дистанцию порядка 50 м дает возможность прожечь не только картон и пластмассу, но и темную металлическую обшивку бензобака автомобиля или колесные покрышки. Свободная продажа подобных ЛЦУ в настоящее время означает вероятность не только хулиганской угрозы (о чем мы уже неоднократно писали и о чем пойдет речь в дальнейшем), но и реальной террористической угрозы. В связи с этим хотелось бы еще раз заявить, что свободная продажа ЛЦУ мощностью более 100 мВт должна быть категорически запрещена, как и реклама таких ЛИЗ в Интернете.

(Продолжение следует)

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Правительства РФ № 1305-п от 24.07.2013.
2. A Guide for Control of Laser Hazards. — ACGIH, 1976.
3. Gordon J.P., Zeiger H.J., Towns C.H. Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave

- Spectrum of NH_3 // *Physical Review*. — 1954. — Vol. 95, Iss. 1. — P. 282–284.
4. *Gordon J.P., Zeiger H.J., Towns C.H.* Maser — New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer // *Physical Review*. — 1954. — Vol. 99, Iss. 4. — P. 1264–1274.
 5. *Басов Н.Г., Прохоров А.М.* Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул // *ЖЭТФ*. — 1954. — Т. 27, вып. 4 (10). — С. 431–438.
 6. *Басов Н.Г., Прохоров А.М.* О возможных методах получения активных молекул для молекулярного генератора // *ЖЭТФ*. — 1955. — Т. 28, вып. 2. — С. 249–250.
 7. *Носов Ю., Сметанов А.* Страсти по лазеру // *Фотоника*. — 2012. — № 6 (36). — С. 50–60.
 8. *Maiman T.H.* Stimulated optical radiation in ruby // *Nature*. — 1960. — V. 187. — P. 493–494.
 9. *Maiman T.H.* Optical and Microwave-Optical Experiments in Ruby // *Physical Review Letters*. — 1960. — V. 4, Iss. 11. — P. 564–566.
 10. *Javan A., Bennet W.R., Herriott D.R.* Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture // *Physical Review Letters*. — 1961. — V. 6, Iss. 3. — P. 106–110.
 11. *Зарубин П.В.* Академик Басов, мощные лазеры и проблема противоракетной обороны // Как это было... Воспоминания создателей отечественной лазерной техники. Часть 1. ЛАС. — М.: Изд-во ФИАН, 2006. — С. 18–41.
 12. *Раутиан С.Г., Собельман И.И.* Фотодиссоциация молекул как способ получения среды с отрицательным коэффициентом поглощения // *ЖЭТФ*. — 1961. — Т. 41. — С. 2018–2020.
 13. *Вещество в экстремальных условиях*. — Саров: Изд-во ВНИИЭФ, 1992. — С. 97.
 14. *Basov N.G. et al.* High-energy explosively pumped photo-dissociation lasers. // *Proc. SPIE 3574, XII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference*, 398 (December 22, 1998).
 15. Лазерный меч США отправлен на консервацию // *Лазер-Информ*. — 2012. — № 5–6 (476–477). — С. 13.
 16. Экспериментальный боевой лазерный комплекс воздушного базирования А-60. // <http://bmpd.livejournal.com/6226.html>.
 17. Российские ученые разрабатывают боевой лазер для авиации // *ИА «Оружие России»*, 2009.
 18. Лазеры возвращаются // *Военно-промышленный курьер*. — 2013. — №49(517).
 19. У России снова появится боевой лазер? // *masteroc, Live Journal.com*, 2012.
 20. *Саков В.* Боевой 100-кВт лазер Northrop Grumman. Почти портативный // *3D news*, 2009.
 21. Мобильный лазерный технологический комплекс МЛТК-20 // *Лазер-Информ*. — Вып. № 15–16 (486–487). — С. 3–5.
 22. *Донских Е., Кондзасова И., Шаблинская О.* Без нас никак?! Лазеры и пуанты у нас лучшие! // *Аргументы и факты*. — 2014. — № 21.
 23. *Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М.* Получение состояний с отрицательной температурой в *p-n* переходах вырожденных полупроводников // *ЖЭТФ*. — 1961. — Т. 40, вып. 6. — С. 1879–1880.
 24. А.С. 181737 (СССР). Полупроводниковый лазер с электрической накачкой. Алферов Ж.И., Казаринов Р.Ф. // *Б.И.* — 1975. — № 14. — С. 147.
 25. Application of the lasers. Chapter 13. Laser Safety. // 1973. — P. 133–154.
 26. *Юнг Р.* Ярче тысячи солнц. — М.: Атомиздат, 1961.

Lasers and Safety. Yesterday, Today, Tomorrow. Part 1

B.N. Rakhmanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University

Yu.B. Paltsev, Head of the Electromagnetic Emission Workgroup, Doctor of Medicine, Professor, Labor Medicine Research Institute, Russian Academy of Medical Sciences

V.T. Kibovskiy, expert, Atomtehnostest, Center of Conformance Estimation and Quality Assurance of Facilities, Products and Technologies

V.A. Devisilov, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

The article surveys evolutionary issues of military and civil laser technology, as well as historic aspects of formation and contemporary state of laser safety in Russia and abroad. Biological impact of laser emission and the principles of rule-making are considered. Major regulatory documents for laser safety and laser dosimetry are reviewed. The study grounds the necessity of enhancement of state regulation methods for laser safety.

Keywords: laser emission, laser technology, classification of lasers, laser dosimetry, methods of dosimetric control, open space, regulatory documents, standards, technical regulations, state regulation.