УДК: 67.02: 621.373.826

ЕЩЕ РАЗ О ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

В.В. АПОЛЛОНОВИнститут общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

Первые демонстрации эффективного твердотельного ЛО состоялось на Международном авиасалоне в «Фарнборо». Следующий этап – это борьба с дронами в «Персидском заливе». Чтобы стать серьезным оружием необходимо значительно сократить габариты комплексов, повысить их эффективность и увеличить выходную энергетику. Лазерные «игрушки» мощностью до 60 киловатт в условиях плотной и влажной воздушной среды для использования в силовом режиме малоэффективны. Но и гига/тераваттного уровня импульсы при нано/микро-джоульной энергетике одиночного ультракороткого по времени воздействия импульса не являются панацеей. Важны и энергетика, и ее пиковая мощность. Механизмы функционального воздействия ЛО уже хорошо исследованы и есть ниша его применения. Сегодня происходит переход к созданию высокочастотного импульсно-периодического (И-П) режима работы лазера. Исследования в области боевых лазеров находятся уже на том уровне, когда в достаточно близкой перспективе возможно создание значимого средства поражения противника на значительных дальностях.

Ключевые слова: высокоэнергетические лазеры, весовой фактор, волоконные лазеры. дисковые мономодульные лазеры.

Лазерное оружие (ЛО) с книжных страниц уверенно перекочевало в реальную жизнь. Его первое применение на «Фолклендских островах» для ослепления противника было только началом истории, связанной с применением ЛО. Разработка и создание малоэффективных и очень дорогих «лазерных монстров» на газодинамической и химической основах (США) и на электроразрядной, газодинамической и химической основах (СССР) – это был следующий долгий этап развития лазерной оружейной эпопеи. Далее состоялись эффектные, но не эффективные демонстрации ЛО на Международном авиасалоне в «Фарнборо» и в «Персидском заливе» в борьбе с «дронами». Вывод из этой выборочно представленной истории прост – необходимо значительное сокращение габаритов лазерных комплексов, повышение их эффективности и увеличение выходной энергетики. Лазерные игрушки

HIGH ENERGY SOLID STATE LASER TECHNOLOGY REVISITED

V.V. APOLLONOVINSTITUTE OF GENERAL PHYSICS
THEM. A.M. PROKHOROV RAS

The first demonstrations of an efficient solid-state aircraft took place at the Farnborough International Airshow. The next stage is the fight against drones in the "Persian Gulf". To become a serious weapon, it is necessary to significantly reduce the size of the complexes, increase their efficiency and increase the output energy. Laser "toys" with a power of up to 60 kilowatts in a dense and humid air environment are ineffective for use in power mode. But even giga / terawatt-level pulses with nano / micro-joule energetics of a single ultra-short-term exposure to a pulse are not a panacea. Both energy and its peak power are important. The mechanisms of the functional impact of LN have already been well studied and there is a niche for its application. Today, there is a transition to the creation of a high-frequency repetitively pulsed (I-P) mode of laser operation. Research in the field of combat lasers is already at the level where, in a fairly close perspective, it is possible to create a significant means of engaging the enemy at significant ranges.

KEYWORDS: High energy lasers, the weight factor, fiber lasers, mono module disk lasers

DOI: 10.52531/1682-1696-2021-21-4-40-44

мощностью до 60 кВт в условиях плотной и влажной воздушной среды в силовом режиме малоэффективны. Но и гига-/тера-ваттного уровня импульсы при нано-/микро-джоульной энергетике одиночного ультракороткого по времени воздействия, о котором в последнее время эксперты опять усиленно начали писать, не являются панацеей. В действительности, для разных видов поражения важны оба фактора как общая энергетика воздействия непрерывного лазерного луча (силовой режим), так и пиковая мощность импульсов при импульсном режиме (функциональный режим)! Механизмы функционального воздействия хорошо исследованы и у них есть своя специальная ниша применения и уже состоявшийся закономерный выход лазерных специалистов на высокочастотный импульсно-периодический (И-П) режим не случаен. И все же, все это – только осторожные попытки понять то, с чем нам

предстоит работать дальше. ЛО сегодня уже вышло на уровень зрелости, позволяющий создание очень значимого средства поражения противника. Стратегическое и тактическое ЛО – это новая парадигма развития вооружений, тактики и стратегии его применения. Оно действует мгновенно и по прямой линии, т.е. не требует учета баллистики. Это означает, что в верхних слоях атмосферы и, тем более, в космосе, где практически нет поглощения и рассеяния излучения, высокоэнергетическое ЛО будет определять очень многое (если не все) в стратегии и тактике вооруженной борьбы. Мир об этом начнет узнавать в конце 2022 го года, когда США частично оснастят свою военную авиацию (и не только) компактным и легким тактическим ЛО, способным решать большой спектр задач в силовом и функциональном режимах на дальностях во многие десятки и сотни километров соответственно. На следующем этапе, когда высокоэнергетическое стратегическое ЛО с дальностью воздействия в тысячи и десятки тысяч километров выйдет в космос, а это усилиями США произойдет неминуемо, станет хорошо понятной истинная цена этого вида оружия.

В этой связи представляет интерес программа США под названием «SHiELD» (Self – protect High Energy Laser Demonstrator), что означает самозащиту на основе высокоэнергетического лазера. В ней речь идет о создании истребителя 5-го – 6-го поколения с лазером на борту для его защиты от ракет воздух-воздух и земля-воздух. Программа «SHiELD» является комплексной программой создания конечного продукта – ЛО. Он включает разработку компанией «Northrop Grumman» системы управления лучом лазера, разработку собственно лазера компанией «Lockheed Martin» и интегрирование всей оружейной системы в единый лазерный комплекс «SHiELD» компанией «Boeing». На сегодняшний день «Air Force» США планируют получить этот лазерный авиационный комплекс из-за коронавирусной пандемии и технических трудностей только к концу 2022 го года. В рамках программы последовательно были созданы твердотельные лазерные системы на основе волоконных лазеров со спектральным сложением излучений единичных источников. Было последовательно доложено о создании лазера со средней мощностью 30 кВт потом 60 кВт и даже 150 кВт. Выбор волоконного лазера как единичного элемента сложения мощностей определяется его высоким качеством излучения, компактностью и малыми весовыми характеристиками. На сегодняшний день весовой фактор доведен до уровня в 5 кг/кВт. Этот фактор включает оценку веса самого лазера, источника его питания, системы сброса излишнего тепла и всю платформу, держащую эти системы как единое целое. В планах компании «Lockheed Martin» довести этот фактор до уровня в 2 кг/кВт. Это означает, что ЛО мощностью в 10 МВт будет весить, если его удастся сделать, всего 20 т. Цифра выглядит

очень красиво и перспективно для развития стратегического ЛО. В компании уже проведена отработка технологии созданного опытного образца лазерной системы в 300 кВт с общим весом всего в 600 кг. Для сравнения следует сказать, что лазерные системы на газовой, химической и паровой основах, от которых США уже отказались (COIL, GDL, HF/DF, пары щелочных металлов) демонстрируют весовой фактор в пределах 200–400 кг/кВт, что означает, что мегаваттный комплекс ЛО уже с трудом может быть размещен в тяжелом авиационном носителе. А для достижения господства в воздухе необходимо создание и оснащение серийной боевой маневренной авиации легкими и компактными тактическими комплексами ЛО с весом в пределах нескольких сотен килограмм.

Особое значение весовой фактор приобретает при рассмотрении вопроса оснащения лазерами космических аппаратов, т.к. это уже стоит в повестке дня США. Согласно задачам «Стратегической оборонной инициативы» (СОИ) и накопленному опыту эксплуатации уже созданных в прошлом лазерных систем подтверждается необходимость создания комплексов ЛО с выходной мощностью в несколько десятков МВт. Поэтому только твердотельная технология позволяет смотреть в будущее уверенно. Только имея развитую твердотельную технологию можно говорить о создании всего комплекса ЛО, удовлетворяющего поставленным в программе СОИ задачам. Так, комплекс ЛО на твердотельной основе мощностью в 10 МВт весил бы в пределах 20 т, что уже приемлемо для стратегического комплекса ЛО! Тем не менее, используемая США технология сложения излучений волоконных лазеров пригодна по целому ряду причин только для тактического ЛО мощностью до 500 кВт.

Есть и другой «современный» твердотельный лазер – дисковый. Этой идее акад. Н.Г. Басова правда уже 55 лет, но именно этот принцип построения мощных лазерных комплексов оказывается сегодня и надолго в будущем доминирующим. При том же, весьма выгодном весовом факторе < 5кг/кВт этот конструктивный принцип позволяет реализацию высокоэнергетического высокочастотного И-П режима, т.к. апертура существующего сегодня дискового лазера имеет диаметр порядка 1,5 см, что значительно больше диаметра активного тела волоконного лазера. Для увеличения средней мощности системы несколько дисков складываются в оптическую последовательность «ZIG-ZAG», значение средней мощности такого модуля сегодня уже составляет 50 кВт. Модули, как и в случае волоконных систем, могут выстраиваться параллельно и мощность складывается на цели. Исходя из приведенных цифр видно, что 100 кВт лазер будет весить менее 500 кг!!! Параллельное сложение модулей ведет к увеличению общей апертуры системы и, следовательно, к возможности увеличения энергии импульсов в высокочастотной периодической по-

следовательности, что качественно меняет механизм взаимодействия, позволяя многие новые эффекты на мишени. Однако следует отметить, что комплексы ЛО значительно большей средней мощности нужны для выполнения задач ВС РФ. Но от существующей в настоящее время дисковой технологии с модулем мощностью даже в 75 кВт (это увеличение планируется за счет качества отражающих покрытий) до уровня мощности всей системы порядка 10 МВт видится дистанция гигантского размера. Сложить мощность более 100 модулей в единый луч в случае мобильного комплекса не представляется возможным. Уместно вспомнить широко известные в истории твердотельного лазерного творчества опытные модели комплексов «Омега» (96 модулей) и «Тандем» (60 модулей) с точки зрения их технических параметров и надежности. Очевидно, что необходимо иное конструктивное построение твердотельного комплекса ЛО, которое позволило бы дальнейшее эффективное масштабирование его средней мощности при сохранении характерного для современного твердотельного ЛО весового фактора. Именно таким решением задачи масштабирования представляется создание лазерного источника с мономодульной геометрией диска большого диаметра, в котором решены две, оставшиеся в наследство от акад. Н.Г. Басова проблемы: эффективное охлаждение тела диска и подавление усиления спонтанного излучения вдоль его диаметра. Принимая все сказанное выше, важно сделать ряд значимых выводов, влияющих на адекватное понимание проблемы современного компактного и легкого твердотельного ЛО:

- Твердотельная технология в мире вышла на уровень зрелости, позволяющий создание разумного по мощности тактического ЛО с приемлемыми весами и габаритами. Лазерные системы на химической, газовой и паровой основах, от которых США уже отказались (COIL, GDL, HF/DF, пары щелочных металлов), ушли в прошлое, т.к. стало понятно, что легкое и компактное ЛО на их основе получено быть не может.

- Уже отработанная в США технология тактических лазерных комплексов опирается на волоконный тип лазера, исследования по которому были начаты в России, в дальнейшем развиты и запатентованы в США эмигрантом из России (V.P. Gapontsev, «JPG Photonics»). Сейчас производство волоконных лазеров продолжается в США, Германии и в России («ИРЭ-ПОЛЮС», г. Фрязино). Россия копирует волоконную технологию создания тактического ЛО и технологию спектрального сложения излучения волоконных лазеров, при этом используется импортная элементная база, выборочно разрешаемая Государственным департаментом США только для малого уровня средней мощности. На этой основе полноценное оснащение ВС РФ высокоэнергетическими тактическими твердотельными комплексами ЛО не возможно.

- Волоконные высокоэнергетические лазеры в силу физических ограничений не могут быть высокочастотными И-П с большой средней мощностью и спектральное сложение излучения компактных и легких комплексов ЛО лимитировано тактическим уровнем мощности. В этом заключается большая ограниченность данной технологии, не только стратегический уровень мощности, но и многие новые эффективные применения на ее основе физически не возможны.

- Не до конца понятая гостем во время визита в лабораторию акад. Н.Г. Басова твердотельная технология лазера на основе дисковой геометрии (патент принадлежит А. Гиссену, Штутгарт, Германия) также не позволяет дальнейшее масштабирование средней мощности комплексов ЛО до стратегического уровня. Единственно перспективным на данный момент подходом к созданию всей линейки твердотельных комплексов ЛО от тактического и до стратегического уровня является мономодульная технология, предложенная в России.

- Программа «SHiELD» является комплексной программой создания конечного продукта – тактического твердотельного ЛО. США планируют получить этот лазерный авиационный комплекс 5-го и 6-го поколения только к концу 2022-го года. Сдвиг в реализации программы происходит из-за больших проблем в США с коронавирусной инфекцией и, что гораздо более значимо для продвижения программы, из-за объективных физико-технических трудностей при его создании. Очевидно, что создаваемый новый авиационный лазерный продукт будет способен не только решать задачи собственной защиты от ракетного нападения, но и представит большую угрозу для объектов военной техники (ОВТ) и авиации противника. Лазерное излучение значительно поглощается и рассеивается в условиях «Персидского залива», где было проведено много демонстрационных испытаний лазерных тактических комплексов для борьбы с «дронами». Известно, что в условиях большой влажности мощность луча падает втрое на каждой следующей миле дистанции. И это действительно усложняет применение лазеров в таких условиях. Но из этого не следует вывод, заявляемый многими экспертами у нас и за рубежом, что ЛО не эффективно в принципе! Нужно наращивать мощность лазерного источника и уходить на, действительно, много больший уровень средних мощностей, на другие временные режимы генерируемого излучения.

- Помимо уничтожения дронов есть и совершенно другие военные задачи. Это использование ЛО в верхних слоях атмосферы. На высотах 7–9 км воздушная среда гораздо более прозрачная и прицельные дальности для уничтожения ОВТ даже для уровня мощности в 100–150 кВт могут составить многие десятки км. А если речь идет о мегаваттном уровне мощностей, то работа-

ми компаний из США и СССР уже экспериментально доказана реальность диапазона активного оперирования ЛО до 100 км. Другое дело, что все это, опять же, тактический диапазон дальностей и надо продолжать наращивать среднюю мощность ЛО для достижения стратегического уровня в 1000 км и более при соответствующем контроле весов и габаритов в разумных пределах. А ЛО на химической, газовой и паровой основе с их огромными весами и габаритами ушли с этой стратегической дороги в прошлое. Ныне в головах ученых и конструкторов доминирует твердотельная основа активного элемента комплекса ЛО, именно волоконные и дисковые геометрии активного элемента лазера определяют будущее ЛО практически для всех родов войск.

– Теперь давайте поразмышляем про космос. Там воздуха и паров воды нет и, значит, нет поглощения и рассеяния излучения и флуктуаций плотности среды! В таком случае, адаптивная оптика в ее привычном понимании не нужна. Все будет упираться только в оптическое качество генерируемого излучения, а значит и в качество статической силовой оптики, изготовленной, скорее всего, из карбида кремния, впервые предложенного и реализованного для этих целей до метрового размера зеркала в России. Однако, при работе ЛО в космосе добавляются и новые трудности, такие как сброс излишнего тепла (КПД лазера далек от 100%) и точность наведения на ОВТ при стратегических дальностях. Далее, этот много мегаваттный лазерный комплекс надо умудриться еще и вывезти в космос. Именно для этого акцент в работах США делается на твердотельной технологии, позволяющей обеспечить весовой фактор комплекса ЛО на уровне <5 кг/кВт. И здесь у лазерных систем, исповедующих не твердотельные технологии рабочего тела, следовательно, будут большие трудности в плане реализации оптимальных весов и габаритов конечной системы при ее дальнейшем масштабировании.

– Отброшенные американцами технологии химических, газовых и лазеров на парах щелочных металлов не обеспечивают реализацию весового фактора на уровне <5 кг/кВт. В случае устаревших технологий, уже показавших свою неэффективность в построении комплексов ЛО, весовой фактор, вообще, уходит в область значений 200–400 кг/кВт. Это означает, что стратегическая лазерная система, построенная на этих устаревших физических принципах, оказывается настолько тяжелой и громоздкой, что реально будет годиться только для наземного использования. Мы хорошо помним телевизионные образы этих систем. Компания «Lockheed Martin» заявила недавно о реальной возможности снижения весового фактора для твердотельной технологии до величины менее 2 кг/кВт, что при дальнейшем масштабировании средней мощности систем вполне реально.

– Нужно помнить о поставленной Комитетом начальников штабов США задаче первого этапа, в ко-

торой говорится об установке на боевых аппаратах авиации тактических комплексов ЛО мощностью в 100–150 кВт к концу 2022 года. Такой комплекс на основе твердотельной технологии при весовом факторе 5 кг/кВт будет иметь вес существенно меньше 1 т. В то же время ЛО мощностью 100 кВт на старых и уже отброшенных физических принципах весил бы около 20 т. И это, если оценивать задачу очень оптимистично. По пессимистической оценке все будет гораздо хуже. Ясно, что с такими лазерами выиграть воздух, а на втором этапе и космос невозможно. Достаточно вспомнить судьбу электроразрядных, газодинамических и химических комплексов ЛО у нас и в США. Они все закрыты как абсолютно не эффективные!

– О функциональном поражении цели мы говорили и продолжаем говорить тогда, когда не можем обеспечить требуемые плотность мощности для силового поражения, или продолжительность воздействия в силу выбранного физико-технического принципа, или ограниченности запаса энергии. Также очевидно, что если создано силовое ЛО, то функциональное ЛО этим фактом уже вполне обеспечено, тем более с увеличенной на порядок величины дистанцией поражения (т.к. уровни плотности мощности в этом случае требуются значительно меньшие). Именно поэтому нужно стремиться к созданию ЛО для силового поражения цели при минимальных весах и габаритах! Функциональное ЛО получается в этом случае автоматически. Военные и раньше не любили механизм функционального поражения цели и сейчас мало что изменилось в их позиции. Только силовое поражение наверняка гарантирует выполнение боевой задачи уничтожения ОВТ противника. Это очень хорошо становится понятным на следующем примере. Высокоэнергетическое ЛО в силовом режиме, например, отрезает крыло самолета или крылатой ракеты и оба этих ОВТ гарантированно перестают функционировать. При значительно меньшей энергетике лазера возможно только функциональное поражение ОВТ. Например, у той же ракеты лазер засветил оптоэлектронную систему наведения на цель. Ракета продолжает лететь и в этом случае у оператора нет абсолютной уверенности в потере ею навигационной способности, чтобы достичь защищаемый ОВТ. А эта уверенность у военных должна быть!!! Таким образом, функциональное поражение цели хорошо только тогда, когда силовое объективно невозможно по причине недостатка средней мощности излучения лазера на данной дистанции. И это значит, что разработчикам ЛО необходимо думать о легком и компактном стратегическом ЛО, способном уничтожать ОВТ в силовом режиме, т.е. всегда иметь запас энергии в луче.

– Следует заметить, что не все твердотельные лазерные технологии одинаково эффективны. Стержневая геометрия активного элемента применительно к большим средним мощностям комплексов ЛО окон-

чительно забыта. Геометрия «слаба» также значительно ограничена уровнем выходной мощности единичного модуля. При этом данные геометрии активного элемента лазера ведут к значительным весам и габаритам при невысоком уровне надежности.

Примерно также обстоят дела и с волоконной технологией. Дальнейшее увеличение средней мощности комплекса ЛО в таком случае возможно за счет спектрального сложения излучений отдельных модулей. Простое суммирование излучений на цели (чисто геометрическое) не эффективно по целому ряду причин. Попытки спектрального сложения «волоконников» в США привели к созданию опытного образца ЛО со средней мощностью в 300 кВт. Убедительно показана ограниченность и этого подхода в плане дальнейшего масштабирования средней мощности. Единственно перспективным на сегодняшний день подходом для твердотельной технологии является получение единого лазерного пучка излучения в едином резонаторе с дисковым активным элементом большого диаметра. Именно об этом говорил акад. Н.Г. Басов и именно при этом, разработанном нами в 2013 году физикотехническом решении проблемы масштабирования возможно увеличение средней мощности комплекса ЛО до десятков МВт. В высокочастотном И-П режиме пиковая мощность последовательности импульсов может быть увеличена на несколько порядков величины. А именно это и есть та цель, к которой стремились и стремятся создатели ЛО во всем мире. Только в этом случае могут быть решены проблемы ВС МО России как силовом, так и в функциональном режимах, и которые сегодня выдвигаются на передний план из-за стратегических планов США, продолжающих рваться к мировому господству.

– Одновременно с повышением энергетического вклада в мишень при высокочастотном И-П режиме воздействия на ОВТ достигается дополнительно ряд факторов, важных для функционального воздействия: широкий спектр светового поля, электромагнитное излучение, гигантские токи и сильнейшее звуковое поле (до 20% лазерной энергии может уходить в звук). Таким образом, значительно расширяются возможности комплексного воздействия на ОВТ. При этом все перечисленные факторы возникают на поверхности мишени, а излучение доставляется на мишень при незначительных в сравнении с существующими в традиционном РЭБ размерах телескопа (антенны) в силу малости длины волны этого излучения.

– Волоконные высокоэнергетические комплексы ЛО в силу физических ограничений не могут быть высокочастотными И-П с большой средней мощностью и спектральное сложение излучения компактных и легких комплексов ЛО лимитировано тактическим уровнем мощности. В этом заключается большая ограниченность данной технологии, не только стратегический уровень мощности, но и многие новые

эффективные применения на ее основе физически не возможны.

– Важно также отметить, что в нашей стране создана монополия на разработку и создание тактического и стратегического ЛО. А, как известно, монополисты не терпят конкуренции. Если бы в СССР, а потом и в РФ авиация разрабатывалась только в одном конструкторском бюро, то у нас не было бы такой мощной военной авиации. Для сравнения в США над созданием высокоэнергетического ЛО работает значительное число компаний («Lockheed Martin», «Textron», «Northrop Grumman», «Boeing», «Raytheon», «General Atomics» и др.) и работает очень эффективно. России необходимо создание, по крайней мере, еще одного центра, занимающегося на конкурентной основе проблемами создания ЛО нового поколения на волоконной основе, а также на основе мономодульной дисковой геометрии и высокочастотного И-П режима генерации. Неоправданно мало внимания уделяется развитию элементной базы перспективных типов твердотельного ЛО. Найденное решение проблемы создания стратегического, а значит и всей линейки тактического, ЛО на основе мономодульной дисковой геометрии при отсутствии элементной базы для его создания не позволит быстро оснастить ВС России современным, нацеленным на перспективу ЛО. Одновременно с созданием твердотельных технологий мономодульного диска и волоконной геометрии активного элемента реализация данного проекта послужит локомотивом дальнейшего развития ряда предприятий страны и их перехода на 6-ой технологический уклад, о чем уже давно и настойчиво говорит Президент РФ.

Аполлонов Виктор Викторович,
профессор, заведующий отделом Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН

✉ 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38,
тел.: +7 (985) 920-73-66, e-mail: vapollo@kapella.gpi.ru