

# Циолковский, ракета и лазер

Доктор физико-математических наук

**В.В.Аполлонов,**  
Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН,  
отдел мощных лазеров

## Реализация через век

В начале XX века К.Э.Циолковский писал, что в будущем космические аппараты станут запускать с помощью электромагнитных волн, направляемых от внешнего источника энергии. Это было время открытия радио, научный мир размышлял о могуществе радиоволн и новых их применениях. Лазер еще не был известен миру, но потенциал дальней передачи энергии можно было предвидеть.

Теперь, в начале XXI века, мы можем предложить новый подход к проблеме создания лазерного реактивного двигателя. Он основан на использовании механизма резонансного объединения ударных волн, которые генерирует оптический пульсирующий разряд. Для получения самого разряда надо применить мощное импульсно-периодическое лазерное излучение с короткими импульсами, следующими с высокой частотой. Излучение будет направлено на матрицу рефлекторов, закрепленных на летательном аппарате, рефлектор соберет излучение в фокусе, и это вызовет разряд. При оптимальном выборе частоты импульсов можно сделать незначительными термические и ударные нагрузки на аппарат, исключить возникновение резонансных колебаний в ракете и экранировку лазерного излучения плазмой. Кроме всего этого, мы получим аналог того, что в самолетостроении называется «управляемый вектор тяги». Но главное преимущество нового подхода связано с тем, что источник энергии движения и полезный груз развязаны в пространстве и стартовый вес не намного больше полезной нагрузки.

Новый класс ракетных двигателей будет экономичнее традиционных, работающих на химическом топливе. На начальном этапе полета (до 30 км) в качестве рабочего тела двигатель использует просто воздух, а за пределами атмосферы — незначительный бортовой запас газа или испаряемого вещества, по оценке 20% от веса аппарата. В этом случае удельные затраты на выведение грузов в космос могут сократиться до 5—10 тысяч руб/кг, то есть примерно в 30 раз меньше по сравнению с современным уровнем затрат. После запуска можно с помощью той же лазерной системы корректировать орбиту.



## Реактивное движение по лазерному лучу

В ноябре 2000 года американская компания «Lightcraft Technologies» успешно провела испытания модели ракеты, которая за 13 секунд поднялась на высоту 70 м. В эксперименте использовался низкочастотный (20 Гц) импульсно-периодический CO<sub>2</sub>-лазер мощностью 10 кВт. Реактивный импульс возник за счет испарения этим лазером полимерного материала с вогнутой поверхности отражателя, расположенного в задней части ракеты. В СССР начиная с 1973 года под руководством академика А.М.Прохорова исследовали возможность создания такого двигателя. Отражатель в задней части прототипа ракеты концентрировал полученное излучение в воздухе и обеспечивал микровзрывы, что создавало реактивную тягу. Успешно прошли испытания различных моделей отражателей, которые в то же время были и приемниками набегающей ударной волны для обеспечения тяги. Эти эксперименты проводили также с электроразрядными CO<sub>2</sub>-лазерами мощностью до 10 кВт.

Однако для вывода на орбиту требуется гораздо большая мощность, например, для космического аппарата массой 1000 кг необходим лазер мощностью не менее 10—15 МВт. Такой лазер сегодня может быть только газодинамическим, причем в этом случае лазерщики смогут использовать опыт ракетчиков, которые умеют создавать сверхмощные газогенераторы. Он должен работать в импульсно-периодическом режиме с высокой частотой повторения коротких импульсов для исключения процесса экранирования поступающего лазерного излучения плазмой — чтобы в промежутках между импульсами плазма успела разлететься и уступить дорогу лучу. По мнению специалистов-ракетчиков, лазерно-реактивные двигатели уже сегодня могут найти применение в составе дешевых одноступенчатых средств выведения микроспутников массой до 50 кг.

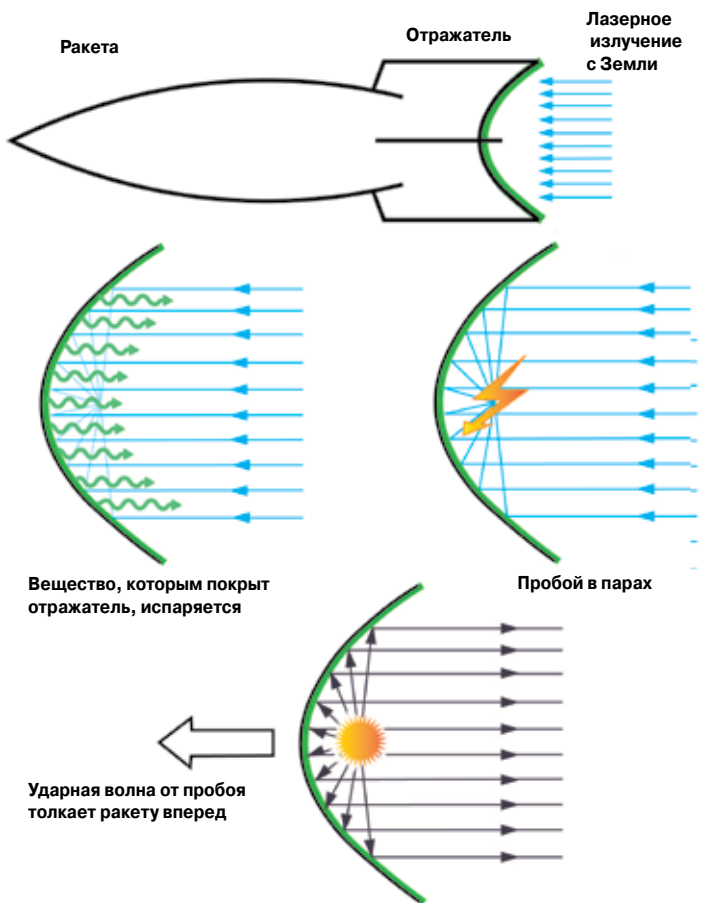
Опыт создания мощных лазеров накоплен в нашем Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, в НПО «Энергомаш» им. В.П.Глушко и других организациях. В ООО «Энергомаштехника» в последние годы проводились успешные экспериментальные

## Лазеры бывают разные

Лазер, или оптический квантовый генератор, — устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, узкополосного (чаще говорят — монохроматического), узконаправленного и обычно поляризованного потока излучения. Лазеры можно классифицировать по среде, в

которой все происходит (твердое тело, жидкость, газ, плазма), по способу накачки, по геометрии среды, по количеству отдельных лазеров, объединенных в устройство. Например, *волоконный лазер* — это твердотельный, в котором средой служит оптическое волокно, а в *дисковом* оптическая среда — не стержень, как обычно, а диск. В отдельную группу выделяют *полупроводниковые лазеры* — твердотельные, но с механиз-

мом накачки, принципиально связанным с тем, что рабочее тело — комбинация полупроводников. *Жидкостные лазеры* чаще называют «лазерами на красителях» — не по агрегатному состоянию, а по составу. А еще есть лазеры на свободных электронах, рентгеновские лазеры и др. О том, какие из них подходят для запуска ракеты на орбиту, читайте в статье.



*Лазерный реактивный двигатель: принцип действия. Запас топлива для выхода на орбиту не нужен, расходуется только испаряемый материал на отражателе, который создает среду для разряда в безвоздушном пространстве*

исследования по использованию импульсно-периодического режима в мощных и хорошо отработанных лазерных системах, обычно работающих в непрерывном режиме. Это позволяет приступить к созданию сверхмощного лазерного источника на основе газодинамического принципа и к созданию двигателя.

Как подтвердили шесть последних симпозиумов в этой области, зарубежные специалисты весьма интересуются созданными в нашей стране мощными излучателями с высокой частотой повторения импульсов (50—100 кГц) и их малой длительностью (100—150 нс). Вот что писал автору «отец лазерного реактивного двигателя» Артур Кантровиц (США): «Дорогой Виктор, спасибо за доставленное удовольствие — прочитайте Ваши статьи с последнего симпозиума по движению с помощью лазерной энергии, которые теперь доступны для научной общественности. Я уже поразмышлял над Вашими работами и считаю, что эти замечательные идеи о квазистационарной волне, о светодетонационных волнах, о матрице рефлекторов, введенные в Ваше новое рассмотрение, очень важны для развития теории и технологии движения с помощью света. Я с восхищением наблюдаю за развитием лазерного запуска в мире и в России в особенности. Надеюсь, что после Ваших публикаций это стимулирует значительную активность в области создания лазерного двигателя и его приложений».

В задаче создания двигателя генерируемое лазером излучение фокусируется рефлектором вблизи заднего торца аппарата и создает периодически повторяющиеся лазерные искры. Искры генерируют ударную волну, которая передает часть своего импульса рефлектору (см. рис.). В характерных для прежних лет газоразрядных лазерных системах частота повторения импульсов была ограничена временем смены газа в разрядной зоне и составляла 100—300 Гц. В этом случае для достижения высокой средней мощности 10 МВт не-



обходимо было использовать лазерные импульсы с энергией 70—100 кДж. При пониженных давлениях воздуха (высоты более 15 км) долгоживущий плазменный шар, создаваемый одним импульсом, занимал бы практически весь объем рефлектора и, возможно, экранировал бы последующие импульсы.

Еще одна техническая трудность метода — сильные ударные нагрузки при большой энергии импульсов. Использование высокоэнергетических импульсов с малой частотой повторения и, следовательно, с очень высокой пиковой мощностью ограничено также и оптическим пробоем, как на пути луча, так и на поверхности рефлектора. Поэтому надо использовать короткие импульсы с высокой частотой повторения импульсов и воспользоваться объединением ударных волн, генерируемых оптическим пульсирующим разрядом. В этих условиях энергия лазерного импульса при длительности 100—150 нс поглощается и с эффективностью около 30% преобразуется в ударную волну. Также доказано, что удельную силу тяги можно увеличить в несколько раз за счет преобразования радиальной компоненты ударной волны в продольную.

## Какой именно лазер?

Высокочастотный режим излучения был разработан и опробован на базе мощного газодинамического CO<sub>2</sub>-лазера, но его можно реализовать и для других типов мощных лазеров. Над проектами лазеров с выходной мощностью в несколько десятков мегаватт с варьируемой длиной импульсов и их частотой активно работают в США и России; начаты работы и в других странах. Лазеры для такой задачи можно использовать разные, у каждого типа будут свои проблемы, свои достоинства и недостатки. Что касается рабочей среды, то можно использовать лазеры на двуокиси углерода, химические лазеры и твердотельные лазерные системы.

С создания первых лазеров в начале 60-х годов прошлого века исследователи ищут новые принципы построения источников когерентного оптического излучения, расширяющие область применения как в научных и прикладных исследованиях, так и в военной технике. При этом, как правило, стремятся увеличить энергию и уменьшить длину импульса, а среднюю мощность поднять за счет частоты.

Создание мощных лазеров с большим сечением пучка на основе усилительных каналов — непростая задача. Вообще твердотельные лазеры с ламповой накачкой прежних лет с уровнем выходной мощности в несколько десятков киловатт — это чрезвычайно сложные устройства с низкой эффективностью, к тому же требующие постоянной технической поддержки. С другой стороны, твердотельные лазеры с диодной накачкой, построенные по традиционным оптическим схемам, сегодня имеют выходную мощность уже в пределах нескольких десятков кВт и практически не требуют обслуживания на протяжении всего срока эксплуатации (десятков тысяч часов).

Поэтому одно из самых эффективных решений для создания мощных твердотельных лазеров сегодня — многоканальность. Лазер в этом случае набирается в виде решетки идентичных

лазерных каналов, в каждом из которых происходит генерация. Малое поперечное сечение каналов позволяет эффективно и просто осуществить накачку энергии в активную среду и отвод тепла из ее объема. Например, по такой схеме построен 105-киловаттный лазер фирмы «Northrop Grumman», состоящий из 7 каналов по 15 кВт. Однако увеличение выходной мощности до 1 МВт потребует сложения мощности по крайней мере 70 каналов, что представляется весьма проблематичным. Но именно такая мощность требуется для решения многих задач, связанных с удалением космического мусора из околоземного пространства, с лазерным запуском ракет, с созданием проводящих каналов орбитальной дальности и т. п.

Волоконные лазеры для этих целей не применимы из-за малой площади выходного зрачка волокна: они не могут работать в высокочастотном импульсно-периодическом режиме с большой пиковой мощностью при средней мощности в несколько мегаватт. Лазер на парах щелочных металлов не панацея — на этом направлении много сложных физико-технических проблем, о которых начали говорить уже и на международных конференциях. Кроме того, плотность энергии в парах гораздо ниже, чем в твердом теле, следствием окажутся нереальные габариты и вес. А вот мономодульный, то есть не использующий сложения мощностей, дисковый лазер обладает подходящими параметрами.

Дисковая геометрия имеет два преимущества — малый перепад температур по радиусу и высокую лучевую стойкость диска. Однородность температуры по радиусу уменьшает эффект «термической линзы», возникающий из-за зависимости коэффициента преломления от температуры. Вдобавок лучшее охлаждение диска позволяет в принципе получить большую мощность. Однако для создания такого лазера надо было найти метод эффективного охлаждения и способ подавления усиленного спонтанного излучения вдоль радиуса, и мы решили обе эти задачи. Излучение, полученное при генерации в активном веществе единого диска, не потребует дополнительных усилий по фазировке. Подобный лазер будет хорошо сочетаться с телескопом большого диаметра — это позволит концентрировать высокую пиковую мощность лазерного импульса на фрагментах космического мусора. Но главным его достоинством будет высокая эффективность при относительно малых габаритах и весе; предполагается достижение рекордно малого отношения веса к мощности — 3 кг/кВт.

Мы начали статью с запуска космических аппаратов, но высокочастотные мощные импульсно-периодические лазеры найдут применение и во многих других областях: в сфере экологии, для передачи энергии на значительные расстояния, получения мощного плазменного источника излучения в диапазоне десятков-сотен ангстрем, создания произвольной геометрии пробоя в пространстве и так далее. Для некоторых из этих целей необходимо создать в атмосфере проводящий канал. Например, так: на поверхность того самого рефлектора, который стоит на корме запускаемого аппарата и отражает излучение, нанести слой полимерного материала, насыщенного частицами легко ионизирующегося вещества. Этот материал должен быть расположен у поверхности фокусирующего зеркала — приемника ударной волны. Поднимаясь, летательный аппарат будет оставлять за собой канал с высокой степенью ионизации, который образует и в атмосфере, и после выхода в космос. Чтобы понять, зачем такой канал может понадобиться, заглянем в атмосферу.

## Что происходит в атмосфере

Среди прочего в ней происходят загадочные электрические процессы. И если про молнии знают все, то про гигантские молниеподобные разряды в природном конденсаторе «ионосфера — Земля» — джеты и спрайты — слышали немногие. Объем каждого такого разряда — около 5—10 тысяч кубических километров, а величина переносимой энергии может

составлять до нескольких тераджоулей. Все электрические процессы в атмосфере связаны, и в итоге избыток энергии природного электричества преобразуется в механическую и тепловую энергии циклонов, тайфунов и других природных катаклизмов. Электрический пробой такого масштаба может выступать в роли спускового крючка, ведущего к высвобождению накопленной ранее огромной энергии. Используя часть природного электричества в полезных целях, можно управлять погодой на планете: например, вызывая искусственные пробои ионосферы, устраивать управляемый сброс водных осадков в определенных районах земного шара. Не исключено, что с помощью мощных лазерных систем можно будет регулировать климат, влиять на амплитуды магнитных бурь, землетрясений и ураганов.

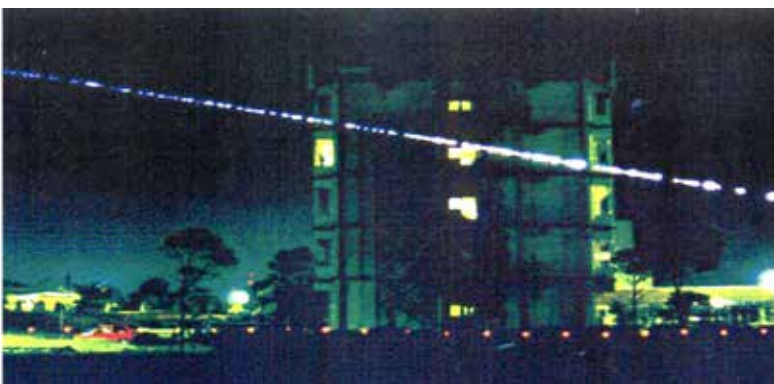
Изучение грозовых явлений сегодня включает и эксперименты по инициированию молний. Чтобы вызвать разряд под грозовым облаком, используют ракету, двигатель которой работает в режиме недостатка окислителя: такая ракета оставляет после себя значительное количество проводящей электричество сажи. Другой вариант инициирования разряда — тянущийся за ракетой провод, что и было сделано в 1960 году. С тех пор проведено около тысячи успешных экспериментов, благодаря которым была детально исследована физика молнии, в том числе лидера, протекающего до основного разряда и преимущественно сверху вниз, основного разряда (который мы видим), протекающего снизу вверх, механизма внезапного усиления светимости молниевых каналов из-за резкого усиления тока и многое другое.

Сегодня открываются новые возможности для управления молниевыми разрядами, в частности с помощью лазеров. Мощные лазеры способны организовать протяженные плазменные каналы в воздухе, которые могли бы инициировать и направлять молниевые разряды подобно металлической проволоке и проводящим каналам из продуктов сгорания ракет.

На возможность ускорения электронов в поле грозового облака (убегающие электроны) указал еще Чарльз Вильсон (чьим именем названа камера Вильсона) в 1925 году. В наши дни эта гипотеза подтвердилась: о генерации релятивистских частиц и квантов высокочастотного излучения в атмосфере, коррелирующих с грозовой активностью, свидетельствует ряд экспериментов. Роль космических лучей в процессах генерации атмосферного электричества продолжают прояснять эксперименты на комплексе «Гроза» Физического института РАН, где уже много лет исследуют корреляции космических процессов с грозовыми явлениями.

Один из новых и совершенно не изученных вопросов — возможное влияние молний на состав стратосферы и мезосферы. Электродинамические явления необходимо учитывать в моделях климата, причем рассматривать грозовые разряды не только как источник оксидов азота, но и как фактор пожарной опасности. Здесь важно распределение зарядов в системе «облако — земля» с точки зрения величины энерговыделения при разряде, а также поведение зарядов при высокой концентрации частиц дыма, то есть при грозе во время пожара. Еще одна задача — оценка влияния заряженных аэрозольных осадков и радиационный баланс атмосферы.

С учетом последних экспериментальных данных и основанных на них теоретических оценок было создано новое описание орбитальной электрической цепи, поддерживаемой в состоянии динамического равновесия поступающим в нее потоком энергии, в первую очередь от Солнца. Оказалось, что электрическая энергия генерируется в областях пониженного атмосферного давления и в зонах холодных фронтов и составляет в среднем  $5 \cdot 10^{14}$  Дж на одном участке. Для управления природными явлениями необходимо научиться стабилизировать запасы энергии в ионосфере — например, передавая эту энергию на Землю с помощью сверхдлинных проводящих каналов.



Лазерная искра  
в атмосфере;  
длина 7 метров



Лазерная искра  
в лаборатории

## Лазер и проводящий канал

Люди непрерывно транспортируют энергию из одного места в другое и решают возникающие при этом проблемы. Самых способов передачи энергии не так много: переменный ток, постоянный ток, режэ — коаксиал, волновод... Распространение сигнала по так называемой однопроводной линии передачи применяется в радиотехнике, но только на высоких частотах, в СВЧ-диапазоне. Возможное развитие этой технологии — замена проволоки лазерно-плазменным каналом.

Кроме того, в последние 20 лет в лабораториях многих развитых стран ведутся исследования по созданию системы лазерной молниезащиты. В ее основе лежит так называемая длинная лазерная искра, соединяющая грозовое облако с заземленным металлическим стержнем — классическим молниеотводом. Максимальные длины управляемого лазерной искрой электрического разряда — 16 метров — были получены в России и Японии при использовании импульсных электро-разрядных  $\text{CO}_2$ -лазеров с энергией до 0,5 кДж. В этой области используют множество различных типов лазеров, но широкое применение нашли только два: импульсные субмикросекундные  $\text{CO}_2$ -лазеры и фемтосекундные твердотельные лазеры.

Для создания коммерческих систем передачи энергии мощные высокочастотные импульсно-периодические  $\text{CO}_2$ -лазеры выглядят привлекательнее, так как в этом случае ниже порог оптического пробоя воздуха. Кроме того, легче достичь энергий в десятки килоджоулей, а для систем, дающих непрерывное излучение, мощностей в несколько мегаватт.

Наши эксперименты в ИОФ им. А.М. Прохорова РАН с традиционной формой излучения импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера и небольшим (до 600 В) потенциалом, приложенным к «концам» лазерной искры, показали, что свечение лазерной плазмы сохраняется не более 10 мкс, в то время как проводимость лазерно-плазменного канала существует значительно дольше — до 100 мкс. Высокочастотный импульсно-периодический режим генерации излучения способен решить задачи воспроизведения проводящего канала в течение длительного времени и увеличения его длины. Основной недостаток описанного способа — его невозможно напрямую использовать в вакууме, за пределами атмосферы.

## Мощные пучки для создания проводящих каналов

В литературе подробно описаны способы передачи электрической энергии с помощью релятивистских пучков электронов высоких энергий. Недостатки данного подхода — большие потери энергии, необходимость генерации самого потока на передающем конце и отбора у него энергии на приемном конце. Известен также способ передачи электрической энергии, включающий генерирование высокочастотных электромагнитных колебаний и передачу их по проводящему каналу между источником и приемником электроэнергии. В этом случае проводящий канал можно сформировать с помощью ускорителя в виде релятивистского пучка электронов, на который подают высокое напряжение с частотой до 300 кГц от спиральной антенны бегущей волны. Этот способ еще сложнее, и эффективность его еще меньше.

Однако проводящий канал можно создать и с помощью мощного импульсного лазера, совершенно так же, как при лазерном запуске космического аппарата. Для этого в среде должно присутствовать легко ионизирующееся вещество — оно наносится на фокусирующую систему, на ту самую матрицу рефлекторов. Каждый сфокусированный импульс лазерного излучения создает в области фокуса протяженную область плазмы, которая распространяется на относительно небольшом отрезке пространства. Если импульсы излучения от лазера будут следовать с малой частотой, то при некоторых скоростях перемещения системы фокусировки луча эти отрезки образуют нечто похожее на пунктирную линию. При частоте же более 10 кГц и оптимальных для среды скоростях перемещения фокуса этой области ионизации уже не будут иметь разрывов и формируемый проводящий канал будет сплошным.

Чтобы перемещаемая оптическая система могла выйти в разреженные слои атмосферы и далее в вакуум, ей, как уже отмечалось, нужен источник создания среды в виде легкоионизируемого вещества, возможно уже содержащего частицы металлов. Такие частицы увеличивают и проводимость канала, и величину импульса тяги лазерного реактивного двигателя. Для проверки нового подхода к созданию проводящих каналов автор статьи с коллегами изготовили перемещаемую фокусирующую систему, которая представляла собой конус диаметром 5 мм и длиной 10 мм. Во внутренней полости отражающей лазерное излучение оптической системы было размещено незначительное количество парафина, содержащего равномерно распределенные в нем частицы графита или пермаллоя размером 10—100 нм. Ракета была запущена с помощью излучения высокочастотного  $\text{CO}_2$ -лазера со средней мощностью 1 кВт.

Подведем итоги. Мощные лазеры, работающие в высокочастотном импульсно-периодическом режиме, весьма перспективны. На их основе может быть создана технология передачи энергии по длинным проводящим каналам. Кроме того, они могут сделать более экономичной и экологичной орбитальную космонавтику.

