

А. В. БАТРАКОВ

Принцип КЕРОСИНОВОЙ ЛАМПЫ

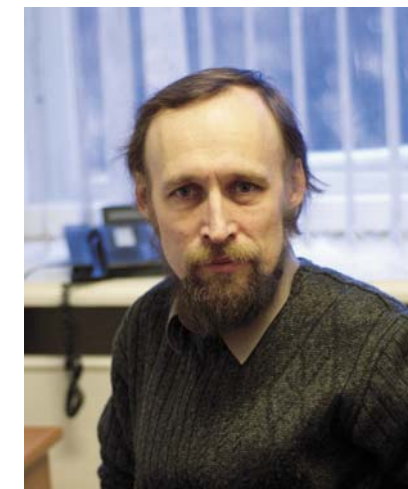
Лазерный микродвигатель для наноспутников



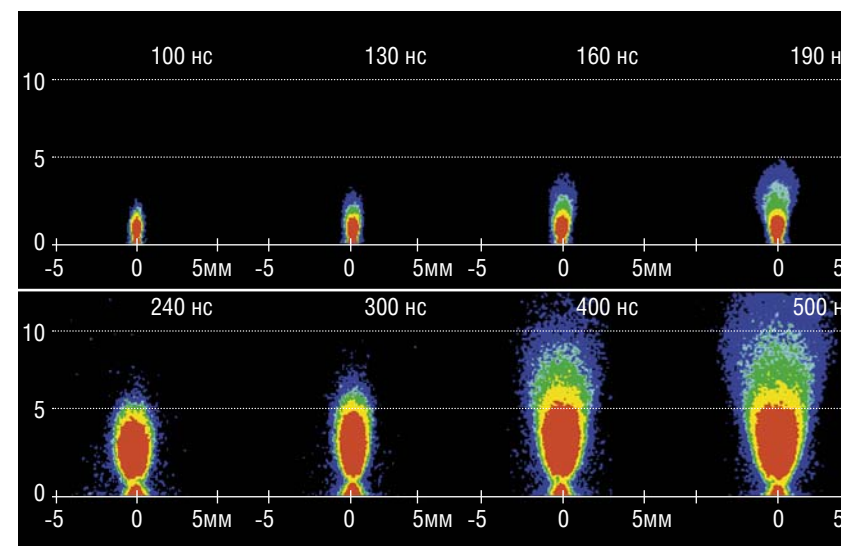
В эпоху миниатюризации спутников необходимы двигатели с высокой степенью воспроизводимости удельного импульса тяги, при этом требуемый минимальный импульс уменьшается так же стремительно, как и размеры спутников. Малые космические аппараты массой порядка 1 кг получили название наноспутников, так как для прецизионного управления ими требуются микродвигатели, производящие импульсы тяги на уровне 10^{-9} Н·с, что и является объяснением приставки «нано». Задача по разработке микродвигателя для наноспутников может быть успешно решена с использованием явления лазерной абляции (испарения под действием излучения) благодаря высокой стабильности и эффективности современных импульсных твердотельных лазеров. Короткая длительность лазерного импульса в сочетании с высокой плотностью энерговыделения на поверхности мишени позволяют генерировать плазменный сгусток микроскопического размера с высокой скоростью истечения плазмы и практически полным отсутствием капельной фракции.

При этом одна из проблем технической реализации связана с мишенью, которая должна воспроизводить свою форму, несмотря на рассеивание рабочего вещества при абляции. Простое и эффективное решение этой проблемы было найдено в результате научно-технического сотрудничества ЦНИИ машиностроения и Института сильноточной электроники СО РАН. Вместо ненадежной механической системы подачи рабочего вещества в предлагаемом изобретении используется капилляр, заполняемый жидкостью под действием силы поверхностного натяжения, — тот же принцип лежит в основе керосиновой лампы

В основе лазерно-плазменного двигателя лежит явление светоабляционного давления, впервые описанное Г. А. Аскарьяном и Е. М. Морозом в 1962 г. Давление в плазме, создаваемой при лазерной абляции, приводит к высоким скоростям истечения вещества. Использование данного явления в космической технике с целью преобразования энергии лазерного излучения в кинетическую энергию (механический импульс) представляется очевидным шагом, поэтому логично было бы предположить, что пальма первенства в технических разработках также принадлежит советской науке.



БАТРАКОВ Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией вакуумной электроники Института сильноточной электроники СО РАН (Томск). Область научных интересов: электрическая изоляция и разряд в вакууме. Приглашенный редактор спец. выпуска IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, посвященного электрической изоляции в вакууме. Автор и соавтор 55 научных работ и 5 патентов.



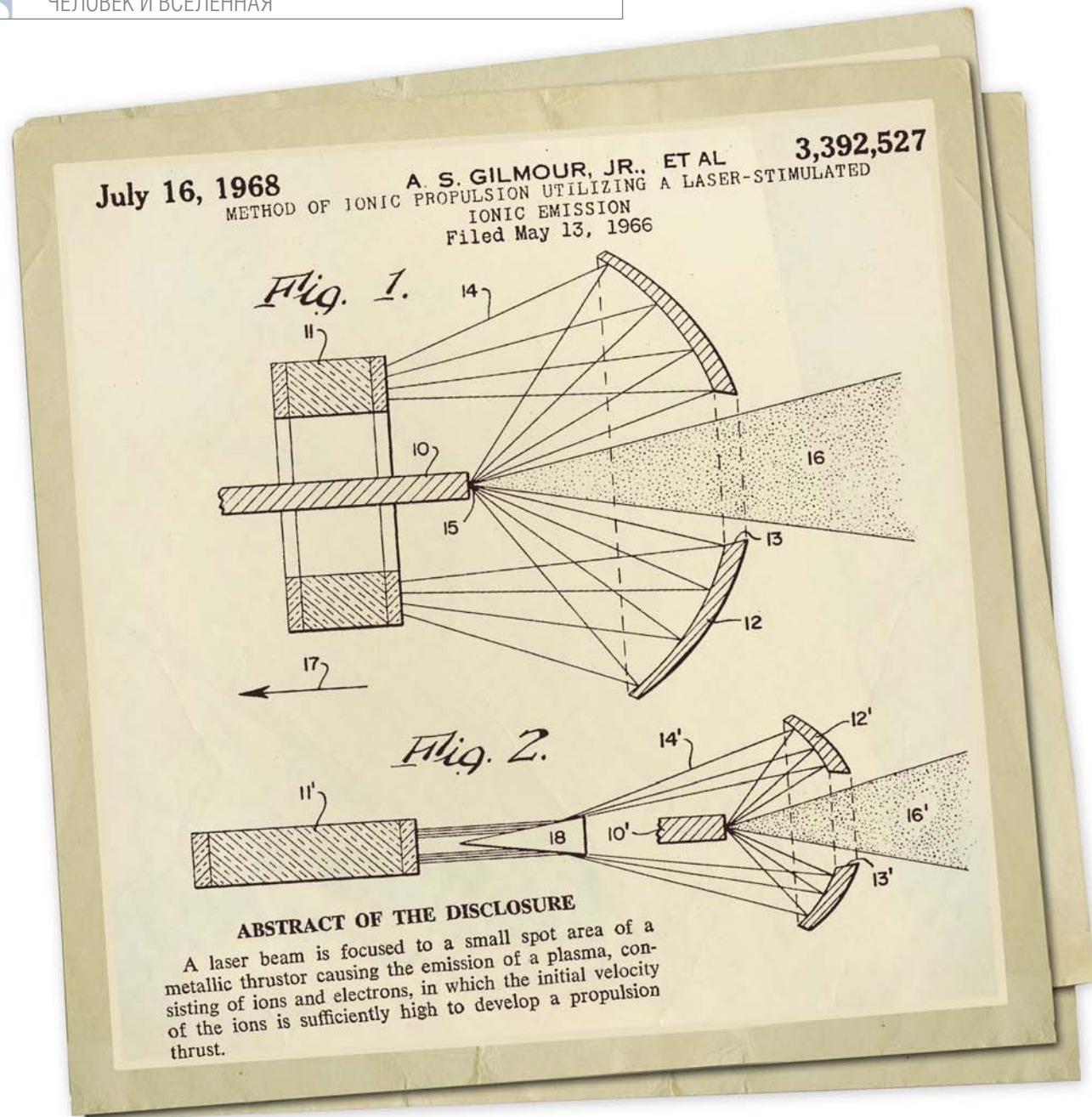
Динамика истечения плазменного факела из зоны абляции, зафиксированная благодаря использованию сверхскоростной регистрации изображений (длительность экспозиции камеры – 3 нс). Вписанные в прямоугольники цифры (в наносекундах) соответствуют времени, прошедшему по окончании воздействия лазерного импульса длительностью 5 нс

Абляция – удаление вещества с поверхности твердого тела потоком горячих газов, обтекающим эту поверхность, что происходит в результате эрозии, расплавления, сублимации.

Лазерная абляция – метод удаления макроскопического количества материала под действием импульсного лазерного излучения. Вещество испаряется или сублимируется в виде как свободных молекул и атомов, так и ионов, то есть над облучаемой поверхностью образуется плазма. При низкой мощности лазера она обычно темная (не светящаяся)

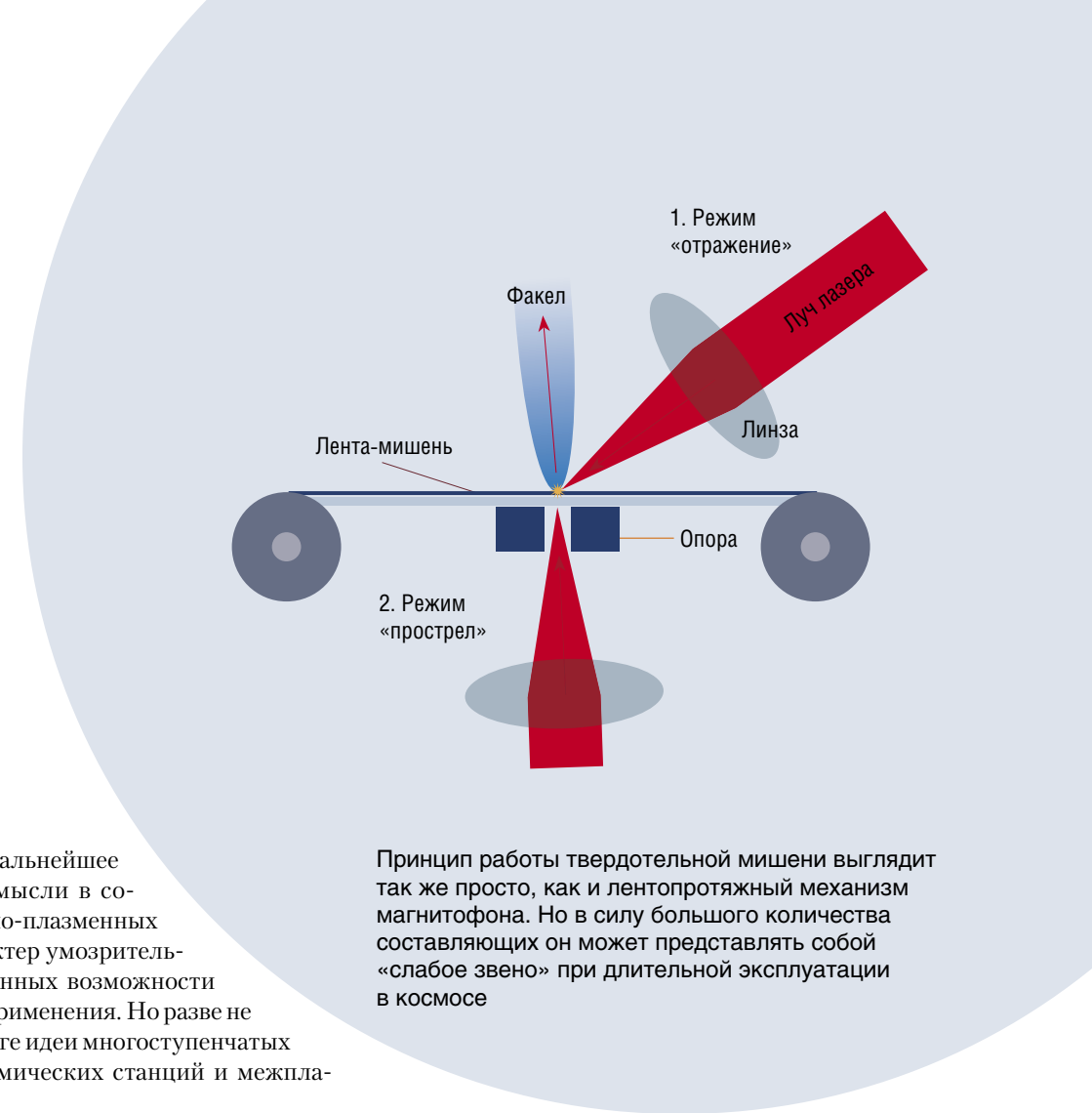
Ключевые слова: лазерная абляция, лазерно-плазменные двигатели, диагностика низкотемпературной плазмы.

Key words: laser ablation, laser-plasma thrusters, low-temperature plasma diagnostics



Тем не менее, первый лазерно-плазменный двигатель был запатентован в США в 1968 г. А. С. Гилмором и Ф. А. Гиори. Возможно, причина потери приоритета кроется в закрытости данной тематики в СССР. Однако нельзя исключать и тот факт, что усилия советских ученых были направлены на достижение рекордных значений параметров удельного импульса тяги (которые бы превышали величину тяги существующих реактивных двигателей), чего не могли обеспечить оптические квантовые генераторы 1960-х гг. из-за своих больших размеров.

Первый патент на лазерно-плазменный двигатель принадлежит США: «Луч лазера фокусируется в пятно малой площади на металлической мишени двигателя, генерируя плазму, состоящую из ионов и электронов, в которой скорость ионов исходно велика настолько, чтобы обеспечить тягу»



Принцип работы твердотельной мишени выглядит так же просто, как и лентопротяжный механизм магнитофона. Но в силу большого количества составляющих он может представлять собой «слабое звено» при длительной эксплуатации в космосе

В 1970-х и 1980-х гг. дальнейшее развитие технической мысли в совершенствовании лазерно-плазменных двигателей носило характер умозрительных конструкций, лишенных возможности скорого практического применения. Но разве не так же рождались в Калуге идеи многоступенчатых ракет, орбитальных космических станций и межпланетных полетов?

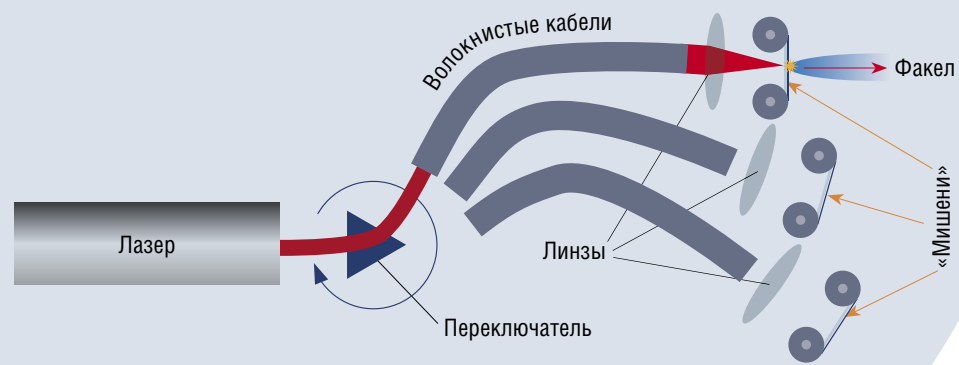
Ситуация изменилась в 1990-х гг., когда были разработаны высокоэффективные лазерные светодиоды, позволившие в дальнейшем создать твердотельные лазеры с эффективностью 40–60 % преобразования электрической энергии в энергию излучения. Данное обстоятельство сделало идею лазерно-плазменного двигателя настолько близкой к реализации, что широкое его применение в скором времени на околоземной орбите не вызывает сомнений.

Лазерное зажигание

Использование лазерно-плазменного двигателя особенно привлекательно в качестве системы управления ориентацией малых (размером с яблоко и меньше) космических аппаратов. При этом для работы микродвигателя достаточно единственного лазера с разводкой лазерного излучения к мишенно-сопловым узлам с помощью элементов волоконной оптики. Такая конструкция позволяет существенно снизить весогабаритные и энергетические характеристики двигательной установки спутника.

Мишенно-сопловый узел является вторым по значимости (после лазера) элементом лазерно-плазменного двигателя, поскольку именно он содержит рабочее вещество, истечение которого обеспечивает передачу механического импульса космическому аппарату вследствие реактивной тяги. Оно должно иметь достаточно низкую теплоту сублимации и минимальную глубину проникновения излучения вглубь, чтобы приводить к поверхностному перегреву и как можно более высокой скорости истечения. В качестве такого рабочего материала в настоящее время, как правило, используется полупрозрачный пластик либо прозрачная пластиковая лента с нанесенным на нее непрозрачным слоем.

В результате испарения вещества форма мишени меняется, что приводит к необходимости ее перемещения для воспроизводства условий в зоне абляции и поддержания стабильности вектора тяги от последовательных импульсов лазерного излучения. Довольно простым решением для восстановления формы и прочих свойств мишени является устройство, напоминающее



Один лазер способен обеспечивать энергией все мишенно-сопловые узлы спутника, экономя массу и энергию силовой установки

лентопротяжный механизм магнитофона, в котором лента играет роль рабочего тела.

Несмотря на кажущуюся простоту, система механического перемещения рабочего вещества в зону абляции недостаточно надежна при многолетней эксплуатации спутника в условиях космоса вследствие ряда недостатков, присущих твердотельным мишеням. Проблема состоит в том, что приходится перемещать тело, значительно превышающее по массе долю используемого рабочего вещества. Но любое механическое движение внутри спутника приводит к изменению, пусть даже малому, ориентации спутника.

Кроме того, система подачи подразумевает некоторое натяжение ленты (либо жесткую фиксацию мишени, если она представляет собой массивное тело). Однако в условиях радиационной нагрузки, вакуума, колебаний температуры в широких пределах неминуемо будет происходить деградация пластика, выражающаяся в его деформации и ухудшении механических характеристик. Да и само по себе перемещение подразумевает наличие электропривода на каждом из мишенно-сопловых узлов спутника. Все эти факторы, вместе взятые, приводят к слишком большой вероятности отказа узла, в результате чего будет потеряно управление ориентацией спутника в пространстве.

Многие вышеперечисленные проблемы могут быть решены путем использования жидкости в качестве рабочего вещества лазерно-плазменного двигателя. Есть способы, с помощью которых жидкость можно относительно легко подавать в зону абляции. При этом нет необходимости в использовании носителя для ее

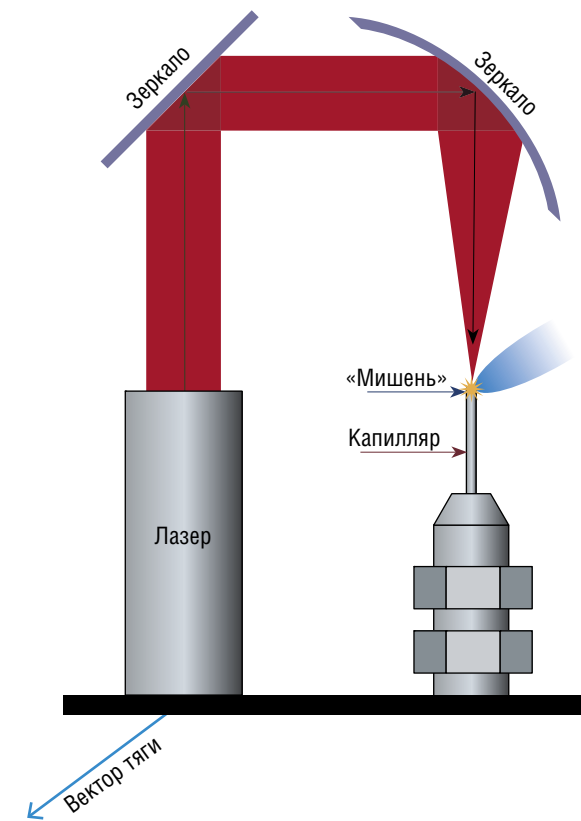
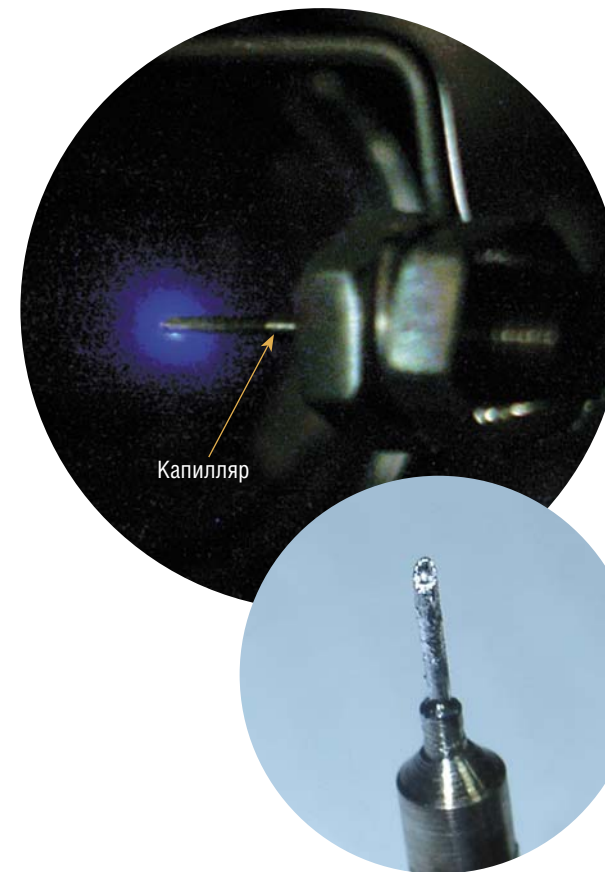
перемещения, что означает полное использование рабочего материала и экономию массы.

Однако жидкость как рабочее вещество не лишена недостатков. Главным из них является ее расплескивание и, как результат, эмиссия капель в окружающее пространство. В силу особенностей процесса эти капли разлетаются в радиальных направлениях, не давая полезного вклада в тягу. Кроме того, из-за существенно большей по сравнению с отдельными ионами массы капли имеют скорость намного ниже и поэтому представляют собой источник нежелательного загрязнения корпуса спутника.

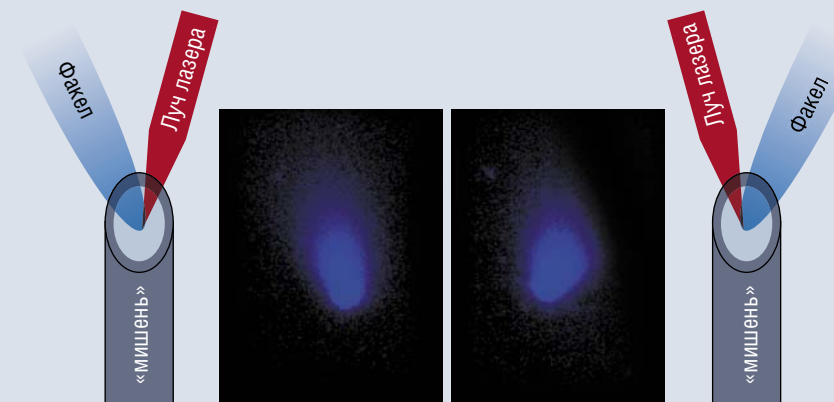
Топливо – жидкий металл

До сих пор в качестве рабочего вещества использовались лишь органические жидкости, большинство из которых характеризуется заметной величиной

Геометрия рабочей области мишени представляет собой вогнутый мениск, форма которого, как показали эксперименты, воспроизводится с высокой точностью даже при работе лазера на частотах в сотни герц. Это дает возможность не только гарантировать стабильность вектора тяги от импульса к импульсу, но и осуществлять юстировку узла путем малого перемещения фокального пятна (его диаметр порядка 100 мкм) в пределах мениска на торце капилляра



Принцип работы жидкометаллической мишени демонстрирует предельную простоту подачи рабочего вещества в зону абляции, что обеспечит надежность узла на орбите. Диаметр этого капилляра – 1 мм, он срезан в области торца под углом 45° на стадии изготовления мишени до ее заполнения



давления насыщенных паров в вакууме, особенно при нагреве выше 100 °С. Это приводит к потерям массы за счет испарения жидкости даже без всякого воздействия излучения лазера.

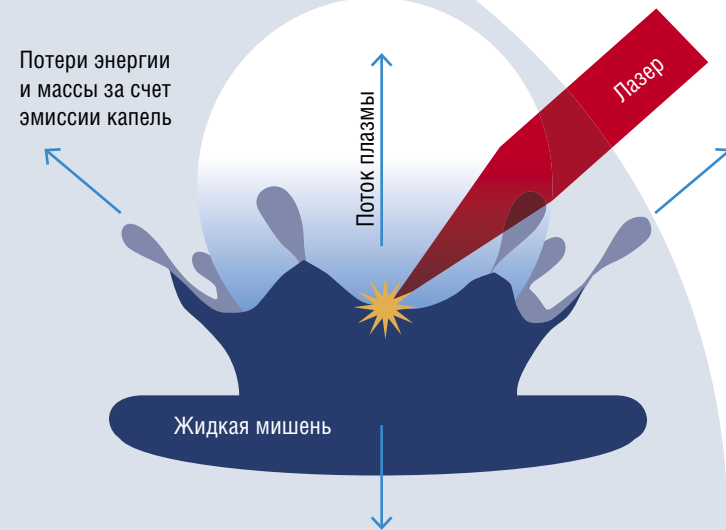
Все перечисленные выше проблемы жидкого рабочего тела могут быть решены путем использования жидкого металла в сочетании с коротким (не превышающей нескольких наносекунд) импульсом лазерного излучения. Сравнительно высокая плотность жидкого металла (более 3 г/см³) является также благоприятным фактором, улучшающим эффективность двигателя. К такому решению пришли сотрудники ИСЭ СО РАН (Томск) и ФГУП ЦНИИмаш, (Королев, Московская область). Разработанный ими мишенно-сопловый узел обладает удивительной простотой, дающей основание рассматривать его в качестве успешного кандидата на длительное и безотказное использование в условиях космоса.

В отличие от схем принудительной подачи жидкости в предложенной конструкции она поступает из резервуара в зону абляции по капилляру самостоятельно – под действием сил поверхностного натяжения, так что дополнительной системы подачи не требуется. В качестве жидкости используется галлий-индиевый сплав с температурой плавления ниже комнатной (+16 °С) и

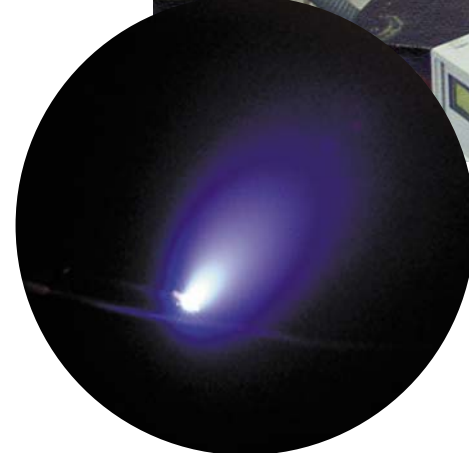
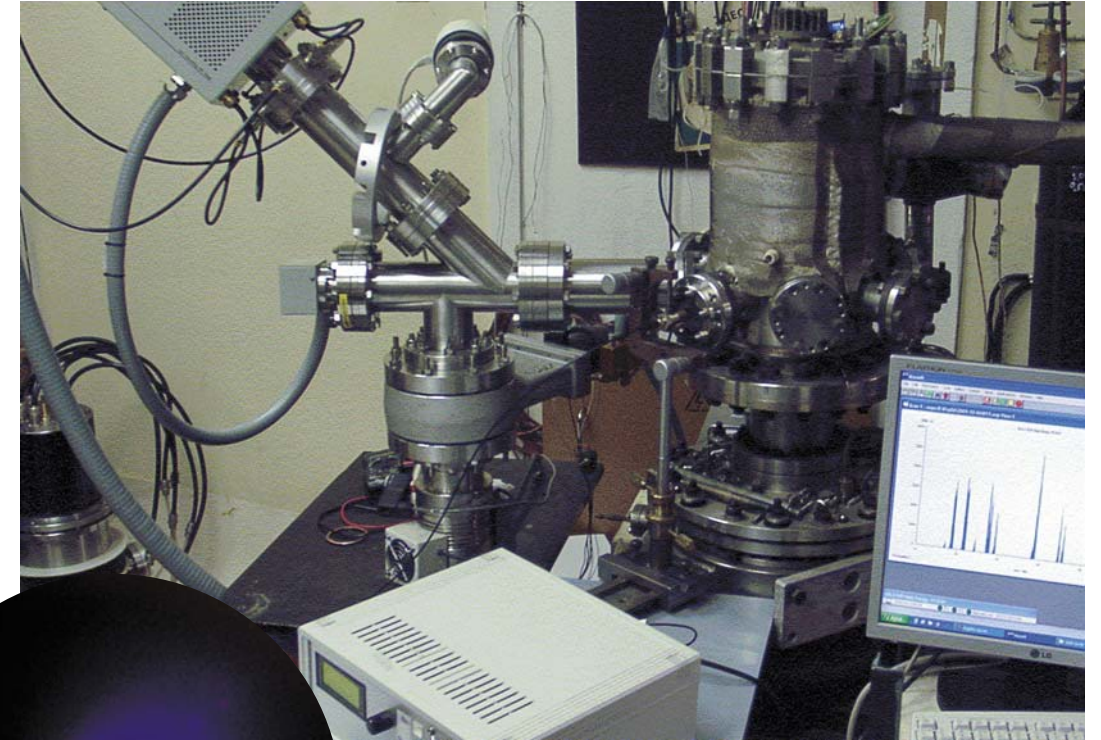
предельно низким давлением насыщенных паров (на много порядков ниже, чем даже для кремнийорганических жидкостей). Этот сплав обладает достаточно низкой вязкостью, сравнимой с вязкостью ртути, что позволяет использовать его в капилляре мишени.

Резервуар, в котором содержится рабочая жидкость, герметичен и вначале полностью заполнен. На орбите по мере ее расходования в резервуаре образуется вакуумная полость, но в условиях космического вакуума извне она не мешает капиллярным силам поддерживать форму мениска. Испытания мишенно-соплового узла, проведенные на экспериментальном стенде в лабораторном вакууме (в диапазоне давлений 10⁻⁵–10⁻⁶ Па), продемонстрировали высокую стабильность абляционного факела в течение длительного срока, ограниченного лишь запасом жидкости в резервуаре. В условиях невесомости, когда гравитация не деформирует мениски, ожидается еще большая стабильность.

При этом термостатирование аппарата необязательно, и вполне допустимо затвердевание рабочего вещества, поскольку жидкая фаза металла требуется только для подачи вещества к зоне абляции, а не для работы двигателя. При включении лазера капилляр, а через некоторое время и резервуар, оттают.



В отличие от плазменного факела, истекающего в нормальном к поверхности мишени направлении, капли разлетаются радиально, приводя к снижению энергетической эффективности и потерям вещества, а также загрязнению корпуса двигателя



Максимальный объем информации о работе двигателя – главная цель лабораторных исследований. В данном деле залог успеха – использование новейшего диагностического оборудования

На фото работающей мишени заметны капли в виде разнонаправленных коротких треков из центра факела, не дающие полезного вклада в тягу

Эффективность преобразования энергии излучения в механический импульс связана с состоянием вещества в факеле. Скорость заряженных частиц плазменной компоненты составляет десятки км/с, а электронейтральных частиц паровой компоненты примерно на порядок ниже. Поэтому одной из ближайших задач оценки эффективности мишени станет исследование соотношения нейтральной и ионной компонент в зависимости от условий процесса абляции.

Литература
 Claude Phipps et. al., *Journal of Propulsion and Power*. V. 26. N. 4. P. 609–637 (2010).
 «Laser Space Propulsion. Applications at two extremes of laser power». Ed. by Claude R. Phipps and James R. Luke. Springer Series in Optical Sciences, 2007. V. 129/2007.
 Бункин Ф.В., Прохоров А.М. «Использование лазерного источника энергии для создания реактивной тяги». УФН, 1976. Т. 119, Вып. 3. С. 425–446.

Работа выполняется при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. в рамках госконтракта № 14.740.11.0317