

ПРИМЕНЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

В.Романько¹, С.Кравченко¹, С.Нестеров¹,
В.Христич², П. Мальцев³
kravchenko_s@bk.ru

Внедрение вакуумной техники и технологии на предприятиях отрасли является одним из ключевых факторов в освоении космоса, причем роль этого направления непрерывно возрастает. Эксперты отмечают, что массовое коммерческое освоение околоземного космического пространства потребует широкой интеграции предприятий вакуумной науки и техники в аэрокосмический комплекс.

Повышение ресурса и удельного импульса ракетных двигателей

Наиболее перспективное решение в плане увеличения удельного импульса и повышения ресурса ракетных двигателей, снижения массы силовой установки, рабочего тела и иных компонентов – создание электрореактивных ионных и плазменных двигателей (ИПД), так как развиваемая ими тяга будет сопоставима с аналогичными параметрами химических двигателей и составит от сотни до нескольких тысяч ньютонов, а удельный импульс достигнет сотен тысяч секунд [1].

Прорыв в этой области связан не только с решением вопроса об увеличении энергии рабочего тела (повышении температуры и скорости его истечения), но и с отказом от использования традиционного механического сопла и устранением контакта рабочего тела (потока плазмы) с элементами конструкции двигателя.

С момента генерации и до истечения за пределы космического аппарата (КА) плазма удерживается в магнитном поле, обеспечивающем также формирование "виртуального" сопла и ускорение рабочего тела (в некоторых конструкциях ускорение обеспечивается посредством комбинирования электростатического и магнитного ускорителей) [2].

Такие ИПД обеспечивают длительную эксплуатацию КА и включают в себя ионный источник или генератор высокочастотной плазмы для перевода вещества рабочего тела двигателя (водород, гелий, азот, аргон, воздух, соединения углерода, криптон, ксенон и др.) в высокоэнергетическое (ионизированное) состояние. Для этих целей используется ионно-плазменный ускоритель, способный сообщать в вакууме исходящему потоку частиц скорость до нескольких сотен км/с, обладающий магнитной системой для бесконтактного удержания разряда и создания "виртуального сопла", обеспечивающего формирование потока рабочего тела заданной формы.

Такое решение позволяет существенно повысить температуру и увеличить скорость истечения рабочего тела, снизив расход последнего и обеспечив импульс тяги, сравнимый с создаваемым химическими двигателями. Важно, что отсутствие контакта рабочего тела с элементами конструкции предотвращает значительный ресурс эксплуатации двигателя.

Магнитная система подобных двигателей строится на основе высокотемпературных сверхпроводящих магнитов, а несущие конструкции – на базе монокристаллических металлических структур.

Эксперты отмечают, что для ракетных двигателей нового поколения ключевыми являются:

- создание высокоэффективных ионных и плазменных источников и ускорителей;
- вакуумное формирование на металлических подложках многослойных керамикоподобных покрытий на основе купратов (высокотемпературных сверхпроводящих магнитов);
- вакуумная кристаллизация металлов, обеспечивающая создание легких высокопрочных

¹ НИИВТ им. С.А.Векшинского (Москва).

² ИСС им. Акад. М.Ф.Решетнева (Железногорск).

³ ИСВЧПЭ РАН (Москва).



конструкций с заданными магнитными свойствами.

НИИВТ им. С.А.Векшинского, имея 40-летний опыт разработки ионных и плазменных источников серий "Ион", "Радикал", линейных и резонансных ускорителей ионов и плазмы, магнитных систем для вакуумной техники, технологий кристаллизации и формирования многослойных покрытий, а также предпроектных работ в области ИПД, может выступить головным исполнителем или соисполнителем при создании подобных двигателей.

Снижение стоимости КА

Решение этой проблемы потребовало качественного скачка в технологиях производства КА и породило новое направление космического аппаратостроения – создание микро- и наноспутников, обладающих теми же функциональными возможностями, что и традиционные КА. Предполагается, что в 2015 году на околоземную орбиту будет выводиться несколько тысяч КА в год, что и будет означать начало массового коммерческого освоения околоземного пространства.

Разработка и изготовление подобных изделий напрямую связаны с решением ряда материаловедческих задач, непосредственно зависящих от уровня развития вакуумной техники и технологии, в том числе в области высокотемпературной сверхпроводимости, создания СВЧ-монокристаллических интегральных схем (МИС), ионно-плазменных двигателей, других высокотехнологических направлений [3–5].

Определяющим фактором обеспечения качества и безотказности функционирования КА является проведение 100%-ного наземного контроля и испытаний в условиях имитации воздействия космического пространства (см. "Наноиндустрия", 2011, №1, с. 42–45).

Здесь представляется целесообразным более подробно осветить другие приоритетные на-

правления применения вакуумной техники и технологии при создании современных КА, среди которых важное место принадлежит разработке и производству новых материалов.

В частности, невозможно изготовить микро- или наноспутник с металлической защитной оболочкой, поскольку в этом случае масса несущего каркаса и материала традиционной теплоизоляции в силу их значительности уже выведут изделие из разряда таких КА. Вместе с тем полезная нагрузка КА нуждается в защите от солнечного излучения, электростатических зарядов, генерируемых на поверхности КА при прохождении через ионизированную среду, от криогенных условий эксплуатации на теневой стороне орбиты и теплового, светового излучения на солнечной стороне, а также от других факторов воздействия космического пространства.

Оболочка современных микро- и наноспутников – это ряд тонких пленок, каждая из которых представляет собой гетероструктуру – многослойную конструкцию, на полимерной основе которой сформированы слои диэлектриков, полупроводников и проводников, отражателей и поглотителей энергии соответствующего спектра. В оболочке могут присутствовать также элементы теплопереноса и электронагреватели, подключаемые для теплоотвода к блокам полезной нагрузки или к тепловым трубам, холодильникам Пельтье, адиабатическим микрохолодильникам.

Создание подобных оболочек и комплексов с использованием экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) – яркий образец применения вакуумных технологий. Для формирования структур оболочек используются высоковакуумные установки, оснащенные механизмами барабанного или рулонного типа для подачи материала, магнетронными распылительными устройствами, электронно-лучевым и резистивным испарителями, контрольно-измеритель-

ной аппаратурой неразрушающего контроля покрытий, получения в вакуумной камере данных о давлении, температуре, составе газовой среды.

Основой оболочки КА могут служить полиимидная, поликарбонатная пленки или пластины. Для создания оптических прозрачных электропроводящих покрытий используются оксиды индия-олова, цинка. В качестве покрытий с управляемыми свойствами перспективны соединения германия, кремния, индия. Для формирования теплоизлучающего слоя применяется кварц, оксид алюминия, алмазоподобные структуры, в качестве отражающего материала – серебро, алюминий, медь, бронза. Для изготовления электропроводящих и теплопроводящих структур используется медь, серебро, нагревательных элементов – медь, никром, а антибликовых и защитных покрытий – слои карбидов кремния или вольфрама, причем толщина слоев таких покрытий может составлять от нескольких десятков нанометров до микрон. В [6] подробно исследованы свойства одного из основных конструкционных материалов для формирования оболочек микро- и наноспутников – полиимидной пленки, а в [7,8] проанализированы технологии производства наноразмерных порошков, являющихся основой покрытий оболочек КА.

В целом, легкая и прочная оболочка микро- и наноспутника представляет собой уникальный продукт вакуумной технологии.

Важное направление работ при изготовлении современных КА – снижение массы солнечных батарей за счет создания гибких тонкопленочных изделий. Их изготовление очень близко к технологии производства материала для оболочек КА, так как подобная батарея представляет по сути гибкую печатную плату, сформированную масочным способом на полиимидной подложке, на которую нанесены слои полупроводника, защитных и оп-



Работы по монтажу вакуумного оборудования

тических покрытий, механических армирующих элементов. В технологическом цикле изготовления подобных батарей основным элементом является высоковакуумная установка, оснащенная механизмом барабанной или рулонной подачи материала, магнетронными распылителями и различными испарителями.

Фактически наноспутник представляет собой "одну большую объемную печатную плату",

на которой смонтированы интегральные микросхемы, другие активные и пассивные компоненты, а также сформированы антенны, устройства для теплоотвода и теплопереноса. Как правило, основу таких КА составляет углепластиковая конструкция, на которой напылением в вакууме сформированы проводящие, диэлектрические и защитные слои, и закреплены корпусированные ситалловые пластины, представляющие собой гибридные микросхемы блоков полезной нагрузки спутника. Вопросы конструирования механических и тепловых систем платформы таких спутников освещены в [9].

Второе направление – радиальное снижение энергопотребления бортовой исследовательской, измерительной, вычислительной аппаратуры, а также уменьшение на порядки массогабаритных характеристик антенно-фидерных устройств КА.

Прогресс в технологиях изготовления интегральных микросхем позволил при энергопотреблении в несколько десятков ватт создавать бортовые вычислительные комплексы, способные в реальном времени решать многомерные векторные и ретро-задачи, обеспечивать качественное техническое зрение, распознавание образов, численные координат и коррекцию орбиты, сбор и обработку гигабайтных потоков телеметрической информации и данных бортовых комплексов. Вопросы отработки программно-аппаратных задач для наноспутников рассмотрены в [10].

Гораздо более сложная проблема – снижение энергоемкости и массогабаритных характеристик приемно-передающей аппаратуры. Наиболее эффективный способ достижения данной цели – перевод ее из диапазона в 1–16 ГГц на рабочие частоты от десятков гигагерц до единиц терагерц. Подобный подход благодаря возможности создания узконаправленных потоков излучения позволит существенно снизить габариты антенн и мощность радиопередающих устройств. В указанных диапазонах

узкофокусированные диаграммы направленности формируются не за счет геометрических ухищрений с формой рефлекторов, дополнительных отражателей, а при помощи активной фазированной антенной решетки (АФАР). Например, в диапазоне с длиной волны 3 мм (100 ГГц) эффективность АФАР из 25 элементов с размером приемопередающего блока 10×10×3 см и массой около 70 г эквивалентна зеркальной антенне диаметром 3,8 м в X-диапазоне, а двухметровый модуль АФАР соответствует по эффективности гигантской 70-метровой конструкции, применявшейся в космическом аппарате Аракс-Р.

Конечно, перевод рабочих частот спутников в указанные диапазоны потребует организации ряда мелкосерийных специализированных производств заказных МИС, предназначенных для работы в диапазонах 30–150 ГГц и в перспективе до 1 ТГц. Речь идет о микросхемах линейных и малошумящих усилителей мощности, генераторов, управляемых напряжением, смесителей, фазовращателей, аттенуаторов, компараторов.

Наиболее перспективна для таких целей технология создания МИС СВЧ-диапазона на основе НЕМТ-транзисторов с высокой подвижностью электронов. Именно работы в этой области могут дать наиболее близкий конечный результат, поскольку применение таких технологий позволяет существенно уменьшить энергоемкость систем связи, улучшить массогабаритные характеристики и снизить стоимость КА в целом, повысить точность их позиционирования и ориентации [11].

Следует отметить также, что в области космической радиолокации освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов позволит существенно увеличить дальность и качество распознавания малых и сверхмалых объектов, обеспечить радиолокационные системы свойствами интеллектуального технического зрения, а в военной области – повысить эффективность противора-



кетной и воздушно-космической обороны.

В области антенно-фидерных устройств переход на блоки АФАР субмиллиметрового диапазона позволит в разы снизить энергопотребление передающих устройств и на порядок стоимость антенных систем, а массу и габариты, возможно, в сотни раз.

Таким образом, освоение производства МИС миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов является ключевым для создания будущего космической отрасли – микро- и наноспутников.

Основным технологическим оборудованием, определяющим качество МИС СВЧ-диапазона на основе НЕМТ-транзисторов, являются комплексы молекулярно-лучевой эпитаксии для создания полупроводниковых гетероструктур как основы формирования МИС и установок электронно-лучевой литографии, обеспечивающие создание необходимого топологического рисунка.

Разработка подобных отечественных установок, а также создание банка данных технологических и топологических решений МИС проводятся совместно ИСВЧПЭ РАН и НИИВТ им. С. А. Векшинского, а в [12] дан детальный анализ возможных приложений вакуумной техники и технологии для развития производства и модерни-

зации беспилотных летательных КА.

Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке работы В.Акиншину и Н.Пановой.

Литература

1. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 2001.

2. Кейвни Л. Космические двигатели. Состояние и перспективы. – М.: Мир, 1989.

3. Microthrusters power nanosatellites, Space Daily, Aug 19, 1999.

4. Ю.М.Урличич, А.С.Селиванов. Семейство технологических наноспутников для экспериментальных исследований. Четвертая международная конференция-выставка "Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация". – М.: Издание Росавиакосмоса, 2004.

5. Семенов Ю.П., Легостаев В.П., Вовк А.В. и др. Опыт проектирования космических аппаратов малой размерности на базе универсальной платформы "Виктория". – М.: РКК "Энергия", 2007.

6. Нестеров С.Б., Расколец Е.С., Моисеев К.Н., Бороздина О.В., Вололажский А.В., Свечкин В.П. Изучение и анализ микрорельефа полиимидных пленок. – Вакуумная техника и технология, 2009, т. 19, №4, с.249–252.

7. Анциферов В.Н., Бездудный Ф.Ф., Белянчиков Л.Н. и др. Новые материалы. /Под научн/ред/ Ю.С.Карабасова. – М.: Мисис, 2002.

8. Беляев С.А. Нанопорошки пластичных материалов. – Новокузнецк, Изд-во: СГИУ, 2007.

9. Урличич Ю.М., Селиванов А.С., Тучнин Ю.М. и др. Технологический наноспутник минимальной комплектации ТНС-0. Аннотации докладов третьей конференции "Микротехнологии в авиации и космонавтике". – СПб, 2004.

10. Урличич Ю.М., Селиванов А.С. Концепция базовой программы наноспутника. – М.: ФГУП РНИИ КП, 2006.

11. Ильин А.А., Куприянова Н.В. Определение ориентации первого Российского наноспутника ТНС-0 М. Труды 48 научной конференции МФТИ. – М.: Изд-во МФТИ, 2005.

12. Романько В.А., Мальцев П. П., Федоров Ю.В., Кравченко С.В., Нестеров С.Б., Емельянов А.А., Маланин Н.В., Акиншин В.Г., Панова Н.М. Роль вакуумной техники и технологий в развитии и модернизации беспилотных космических летательных аппаратов. Вакуумная техника, материалы и технология. Материалы V Международной научно-технической конференции. /Под ред. д.т.н., профессора С.Б.Нестерова. – М.: НОБЕЛЛА, 2010.