

Н. Н. Болотник, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией, bolotnik@ipmnet.ru,
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,

А. А. Жуков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., design-centre@spacecorp.ru,

Д. В. Козлов, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., risc3@mail.ru,

А. С. Корпухин, канд. техн. наук, нач. отдела, design-centre@spacecorp.ru,

И. П. Смирнов, нач. сектора, design-centre@spacecorp.ru,

АО "Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем", г. Москва

Перспективы использования полиимида в исполнительных устройствах мехатронных микросистем¹

Анализируются известные и практически реализованные технические решения в части применения полиимида в устройствах микросистемной техники космического назначения. Варианты применения классифицированы по функциональному назначению, приведены достоинства и недостатки полиимида при использовании его в современных изделиях, рассмотрены технологические приемы формирования полиимидных слоев.

Ключевые слова: полиимид, мембрана, микромеханика, микроэлектромеханическая система, сочленение, торсион, покрытие, пленка, диэлектрик, актюатор

Введение

К устройствам микросистемной техники сегодня относят совокупность микроэлектронных управляющих и функциональных исполнительных компонентов в едином конструктивном исполнении, принцип действия которых базируется на эффектах, существенно проявляющихся на микроуровне, а технология изготовления основана как на планарных, так и на объемных методах микрообработки. Подобные устройства часто отличаются наличием подвижных объемных конструктивных элементов, выполненных с применением нехарактерных для полупроводниковой микроэлектроники материалов. Применение новых материалов в конструкции позволяет упростить технологический процесс, улучшить характеристики изделий и повысить их функциональность. Одним из таких материалов является органический диэлектрический полимер — полиимид (полипиромеллитимид). Полиимид является хорошо изученным материалом [1], открытым много десятилетий назад, основное применение данного материала находят в качестве диэлектрика для разделения электропроводящих слоев и для их защиты. Также он имеет множество более широких функциональных возможностей, которые могут оказаться полезными при разработке микроэлектромеханических устройств. Благодаря высокой устойчивости к дестабилизирующим факторам космического простран-

ства [2] и высоким физико-механическим показателям особенно актуальным полиимид становится в условиях открытого космоса, однако систематических данных по применению полиимида в устройствах микросистемной техники космического назначения недостаточно.

Основной задачей работы является анализ и обобщение данных по применению полиимида в устройствах микросистемной техники космического назначения.

Основные сведения

Полиимид, в первую очередь, обладает хорошими механическими, диэлектрическими свойствами и высоким значением температурного коэффициента линейного расширения, что и определяет сферы его применения. Его основные электрофизические и механические свойства приведены в работе [3]. Кроме того, полиимид обладает высокой адгезией ко многим материалам, высокой химической стойкостью (в том числе ко многим растворителям и слабым кислотам), температурной стойкостью (температура эксплуатации от -196 до $+380$ °С, кратковременно до $+400$ °С), радиационной стойкостью (среди полимерных материалов полиимид обладает наиболее высокой радиационной стойкостью, диэлектрическая проницаемость изменяется на 5...20 % при дозе облучения 1 МГр) [4]. Тем не менее, несмотря на высокую устойчивость к дестабилизирующим факторам, при использовании полиимида в открытом космосе на высотах 200...700 км одним из наиболее разрушающих факторов явля-

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00949).

Применение полиимида в устройствах микросистемной техники

Наименование функционального слоя	Основные устройства, в которых возможно применение	Технический эффект от применения	Источник
Диэлектрические покрытия	Устройства с электрическими соединениями в кристалле	Электроизоляция между проводниками, защита от короткого замыкания	[5]
Упрочняющие/защитные покрытия	Устройства, подверженные жестким условиям эксплуатации	Благодаря возможности внесения в полимер примесей (например, углеродные нанотрубки) покрытие обеспечивает высокую устойчивость к механическим повреждениям (в том числе при нагрузках на разрыв и при трении)	[6]
Термодеформационные слои	Актуаторные механизмы, использующие тепловую деформацию полиимида	Преобразование энергии тепла в движение, тем самым обеспечивается управляемое перемещение элементов устройства	[7–9]
Формованные гибкие пленки (реплики поверхностей)	Демпфирующие пленки, формованные защитные пленки	Электрическая изоляция элементов конструкции, а также их защита от вибрации и ударов	[10]
Электропроводящие межслойные переходы	Устройства с электрическими соединениями в многослойных конструкциях	Обеспечивается электрический контакт между проводниками, расположенными на разных конструкционно-технологических слоях устройства	[13]
Гибкие элементы конструкции	Сочленения, гибкие соединения в устройствах микроробототехники	Обеспечивают механическую ненапряженную связь между отдельными перемещающимися элементами конструкции	[14–17]
Планирующие слои	Конструкции, содержащие элементы с острыми гранями	Позволяет повысить укрывистость и качество в целом наносимых на неровные поверхности покрытий	[18]
Мембранные элементы конструкции	Датчиковая аппаратура	Технологическая возможность получения мембранных элементов на поверхности пластины-основания	[10]
Свободные (отдельные) пленки	Защитные пленки	Электрическая и механическая защита элементов конструкции	[10]
Несущие основания	Гибкие печатные платы, носители со сформированными функциональными слоями	Обеспечивают механически прочное и в то же время гибкое основание для элементов электромонтажа	[19]

ется воздействие набегающего потока атомарного кислорода [2, 3]. Данный аспект необходимо учитывать при конструировании устройств микросистемной техники.

Применение полиимида в устройствах микросистемной техники можно классифицировать по функциональному назначению полиимидного слоя в конструкции изделия. Основные сферы применения: диэлектрические покрытия, упрочняющие и защитные покрытия, термодеформационные слои, формованные гибкие пленки (реплики поверхностей), разделяющие слои с электропроводящими межслойными переходами, гибкие сочленения элементов микромеханики и микроробототехники, планирующие слои, мембраны и свободные (отдельные) пленки (одно- и многослойные), а также несущие основания для компонентов микроэлектроники. При этом стоит отметить, что некоторые из приведенных выше функциональных особенностей вполне могут пересекаться в рамках одной конструкции. В таблице приведены основные сферы использования полиимида в устройствах микросистемной техники и их основные достоинства.

Практическая реализация

Рассмотрим подробнее каждую из областей техники, в которой полиимид находит применение.

Как уже уточнялось выше, использование полиимида в качестве диэлектрика и защитного покрытия является основным и известно давно. Отметим здесь стоит только малоизученную возможность увеличения прочностных характеристик полимера в имидизованном состоянии за счет внесения в его структуру углеродных нанотрубок или иных армирующих веществ. Данный эффект был подробно проанализирован в работе [6], и результаты позволили подтвердить эффективность данного метода: авторам удалось добиться практически трехкратного улучшения усталостных характеристик актуаторных элементов на основе полиимида. Что касается электрических свойств полиимида, то благодаря высокому значению электрического сопротивления его с успехом можно применять как для финишной, так и для межслойной изоляции проводников. При этом выбирают толщину слоя полиимида, которая варьируется от единиц до нескольких десятков микрометров, в зависимости от напряжения на проводниках.

Благодаря высокому коэффициенту температурного расширения полиимид нашел уникальное применение в термомеханических биморфных актуаторах [7] — устройствах, в которых перемещение элементов осуществляется за счет термической деформации полиимида. Благодаря биморфной кон-

струкции при соединении двух материалов с резко различающимися коэффициентами температурного расширения при изменении температуры происходит деформация материалов и перемещение подвижной балки актюатора. Конструкция может состоять либо из двух наложенных друг на друга слоев (классическая биморфная конструкция), либо представлять собой массив расположенных друг за другом кремниевых элементов трапецевидного сечения из материала с низким коэффициентом температурного расширения, заполняющего получившиеся в такой конструкции V-образные канавки материала с высоким температурным коэффициентом расширения, которым и является полиимид. В качестве первого материала удобно использовать кремний, тем самым, процесс изготовления устройства становится групповым. Схематично конструкция и фотографии термомеханического актюатора с чувствительным слоем показаны на рис. 1 (см. вторую сторону обложки) [8, 9, 11]. Примененный в конструкции чувствительный слой позволяет совместить в одном устройстве функции актюаторного и сенсорного элементов. Проводники чувствительного слоя образуют обкладки конденсатора, емкость которого зависит от перемещения подвижной балки, влажности и освещенности [8, 9]. Полиимид в такой конструкции, помимо функции перемещения балки актюатора, играет роль диэлектрика между обкладками конденсатора (между проводником и кремнием).

Полиимидная пленка, сформированная на рельефной поверхности после отделения от последней, принимает форму этой поверхности, т. е. повторяет рельеф (рис. 2). Технологически такую репликацию [12] можно осуществить несколькими методами, которые отличаются друг от друга способами отделения полиимидного слоя от несущего основания. Полученную таким образом структуру можно использовать как покрывающий электроизоляционный материал для элементов нестандартной формы, либо в качестве демпфирующего материала в конструкциях, требующих защиты от внешних механических воздействий. Демпфирующий эффект достигается за счет формы полученной реплики. Аналогичным способом возможно получение разнотолщинных полиимидных пленок на гладких поверхностях, такие пленки целесообразно использовать в микросборках различных устройств микросистемной техники, в том числе при их корпусировании для защиты элементов от механических повреждений и от короткого замыкания.

Предложен вариант электропроводящего перехода с одной стороны пластины на другую с помощью полиимидного слоя в "окнах" кремния (рис. 3). Для изготовления таких элементов первоначально на подложке кремния анизотропным травлением на одной из сторон пластины формируют области, где будут располагаться отверстия в полиимиде, после чего на эту сторону наносят полиимидный слой и травят данные области с другой стороны до

полиимида. Далее наносят электропроводящий слой с одной из сторон, формируют отверстия в полиимиде и наносят электропроводящий слой с другой стороны подложки. Такая технология позволяет сформировать электрический переход с одной стороны подложки на другую. Данное решение актуально не только для разработанных актюаторов, но может найти применение и в массе других изделий, содержащих электрические соединения слоев. По результатам испытаний электропроводящего перехода через полиимидный слой наблюдалась высокая адгезия (до 10 МПа) металлизированного слоя к основанию и полиимиду и низкое электрическое сопротивление полученного контакта (до 5 Ом).

В работе [13] рассмотрена технология многослойных покрытий с диэлектрическим полиимидным слоем, электропроводящими дорожками и межслойными переходами через полиимид. Покрытия формируют на твердом основании с возможностью дальнейшего отделения многослойной структуры от него. Это значительно расширяет возможности электрического соединения компонентов, расположенных на подложке, увеличивается возможная длина и число линий связи между компонентами, становятся реализуемыми технологические варианты конструкций плоских индуктивных катушек, изготовленных по технологиям объемной и поверхностной микрообработки. Слои металлизации

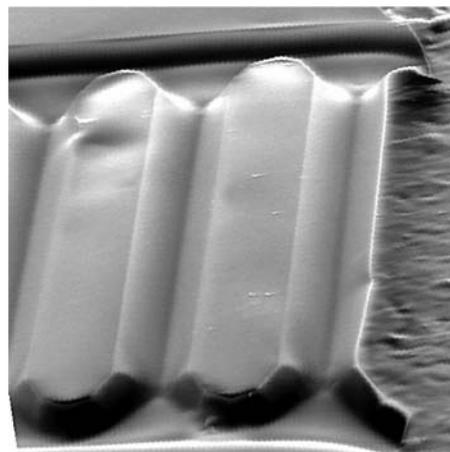


Рис. 2. Образец полиимидной пленки — реплики поверхности [12]

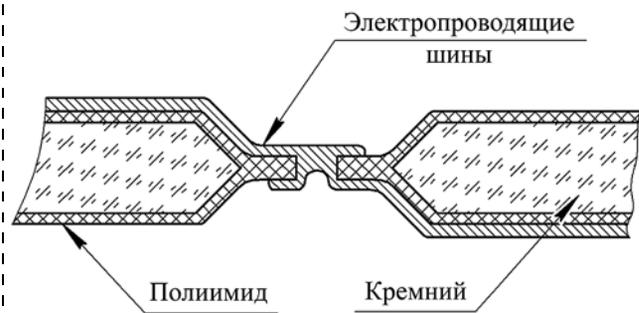


Рис. 3. Структура электропроводящего перехода

каждого витка намотки в такой конструкции разделены диэлектриком в виде полиимида, а контакт между слоями образуется с применением вышеописанных методов получения электропроводящих металлизированных переходов.

Способность к многократному изгибу полиимидной пленки позволяет использовать ее при изготовлении высокочувствительных мембран и гибких вставок устройств микромеханики и микроробототехники [14—17]. Благодаря возможности технологически (контролируя толщину наносимого слоя полиимида) регулировать упругие свойства полиимидной пленки и частично или полностью отделять ее от подложки, на которой она формируется, можно создавать гибкие элементы конструкции, работающие на изгиб или кручение, высоконадежные гибкие соединения, обеспечивающие изгиб/поворот элементов конструкции. Конструкция гибкого соединения состоит из одного или пары полиимидных слоев, наложенных с прямой и/или обратной сторон кремниевых элементов и соединяющих их. Подобные изделия показаны на рис. 4. По результатам испытаний гибкие элементы шириной 1 мм и длиной 1,5 мм обеспечивают усилие от десятых долей до десятков мкН на градус углового перемещения.

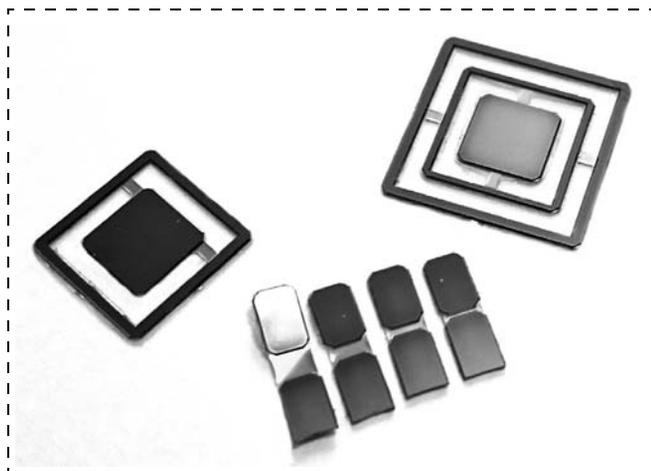


Рис. 4. Образцы гибких соединений

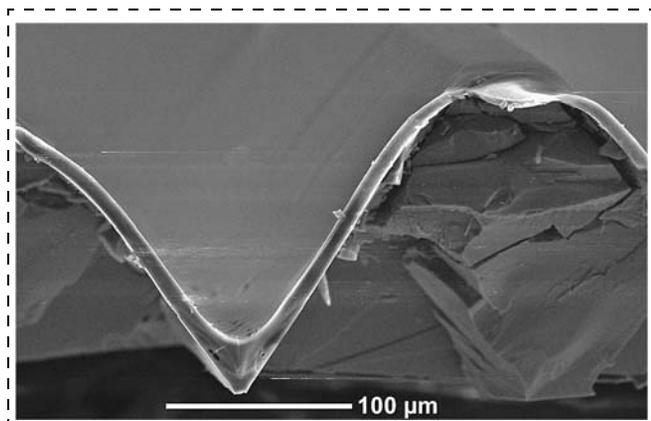


Рис. 5. Покрытая полиимидом рельефная поверхность кремния

Полиимид может применяться для частичной планаризации неоднородной, шероховатой, неровной поверхности изделий на различных стадиях производства, в частности, на операциях нанесения фоторезиста или напыления. Полиимид позволяет сгладить неровности, в особенности на острых гранях, которые появляются при глубинном травлении кремния и, тем самым, повысить укрывистость и однородность наносимого слоя, избежав зон с "пробелами". Полиимид широко используется с этой целью, в частности, при производстве актюаторных элементов [18]. При выполнении операции нанесения фоторезиста на остроугольных гранях могут образовываться дефекты. Использование полиимида позволяет сгладить грани (рис. 5) и избавиться от возможных дефектов при формировании металлизированных слоев сверху полиимида [18]. Кроме того, в данном случае полиимид служит также диэлектрическим изолятором между кремнием и формируемым слоем металла.

При использовании полиимида в качестве несущего основания становится возможным получать гибкие подложки со сформированной в них одно- или многослойной топологией электропроводящих шин. Стандартные методы производства подобных конструкций широко применяются при изготовлении гибких печатных плат. Отметим, что подобные конструкции возможны и на микроуровне. Достигается это последовательным нанесением металлизированных слоев и слоев полиимида и дальнейшим отделением полученной структуры от несущей подложки [14].

Полиимид при использовании его в качестве функциональных слоев устройств микросистемной техники обладает высокой технологичностью. Процесс формирования заключается в последовательности выполнения операций нанесения и термообработки (сушки и имидизации), а также, при необходимости, фотолитографии и плазмохимического травления функционального слоя полимера. Перед нанесением полимера в зависимости от типа поверхности подложки наносят промотор адгезии для увеличения сил адгезионного взаимодействия между материалами и увеличения надежности устройства в целом. В случае с подложкой из кремния таким промотором является γ -аминопропилтриэтоксисилан, который предварительно наносят на подложку и высушивают [12]. Нанесение полиимида проводят одним из трех методов (по степени равномерности покрытия): центрифугированием, спреевым распылением или кистью. После нанесения проводят термообработку полиимида: сушку и имидизацию. При необходимости внесения армирующих элементов в структуру полимера на поверхность сначала наносят тонкий слой раствора полиаминокислоты с содержанием армирующих элементов (например, одностенных углеродных нанотрубок), который в дальнейшем подсушивают, а затем уже на него наносят более толстый слой той же концентрации раствора полиаминокислоты,

но не содержащий армирующих элементов. Имидизацию проводят в вакууме или среде сухого азота ступенчатым нагревом при максимальной температуре, не превышающей 350 °С, температуру выбирают исходя из необходимой степени усадки полимера. В случае многослойных структур благодаря высокой адгезии слоев полиимида друг с другом описанные выше процессы повторяются, пока не сформируется необходимое для функционирования устройства число слоев. Далее, при необходимости формирования рисунка в полученном слое полиимида проводят фотолитографические процессы. В качестве маски, обеспечивающей селективность травления, можно использовать металлы, в том числе алюминий. Негативный топологический рисунок изначально формируют на алюминиевой маске, после чего через открытые "окна" проводят жидкостное травление алюминия и плазмохимическое травление полиимида в кислородной плазме. Заключительным этапом является снятие остатков вспомогательного слоя алюминия. Технология формирования полиимидных функциональных слоев в устройствах микросистемной техники позволяет получить адгезионно-прочные элементы конструкции с высокой точностью изготовления как по толщине (точность до 1 мкм), так и по горизонтальным размерам (в соответствии с топологической нормой производства).

Заключение

В работе проведен анализ вариантов применения полиимида (полипиромеллитимида), формируемого по растворной технологии в качестве конструкционного и технологического материала в микросистемной технике космического назначения, представлены конкретные технические решения. Применение полиимида обусловлено свойствами, наиболее полно отвечающими требованиям эксплуатации и воздействию внешних факторов: термостойкость, физико-механические характеристики, радиационная стойкость, электрическая прочность. Показано, что применение полиимида в устройствах космической микроробототехники перспективно в связи с высокой устойчивостью материала к механическому воздействию и различным дестабилизирующим факторам космического пространства. Выявлены ограничения применения полиимида в устройствах космической микроробототехники для эксплуатации в открытом космическом пространстве, связанные с травлением материала в атомарном кислороде на низких околоземных орбитах и необходимостью обеспечивать устойчивую адгезию к конструкционным материалам устройств.

Список литературы

1. **Бессонов М. И., Котон М. М., Кудрявцев В. В., Лайус Л. А.** Полиимиды — класс термостойких полимеров. Санкт-Петербург: Наука, 1983. 328 с.
2. **Панасюк М. И., Новиков Л. С.** (ред.) Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Москва: Издательство КДУ, 2007. 1144 с.
3. **Матвеев В. В., Никифоров А. П., Скурат В. Е., Чалых А. Е.** О механизме возникновения шероховатости поверхности полимерных материалов при анизотропном травлении пучком быстрого атомарного кислорода // Химическая физика. 1998. Т. 17. № 4. С. 120—128.
4. **Maluf N., Williams K.** An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. Artech House, Inc. Boston, London, 2004. 304 p.
5. **Басовский А. А., Жуков А. А., Анурова Л. В., Харитонов В. А.** Способ изготовления шунтирующего диода для солнечных батарей космических аппаратов. Пат. 2411607 РФ, МПК2011 H01L21/329. АО "Российские космические системы". Заяв. 26.11.2009. Оpubл. 10.02.2011. Б. И. № 4. 8 с.
6. **Корпухин А. С., Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Пешехонцев И. И.** Влияние армирования полиимидного слоя одностенными углеродными нанотрубками на термодформационные характеристики полиимид-кремниевых балок тепловых микроактюаторов // Материаловедение. 2011. № 9. С. 43—46.
7. **Ebefors T.** Polyimide V-groove Joints for Three-Dimensional Silicon Transducers. Ph. D. thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2000. 144 p.
8. **Козлов Д. В., Смирнов И. П.** Функциональные возможности универсальных датчиков на основе термомеханических актюаторов // Инновации и инвестиции. 2013. № 5. С. 191—193.
9. **Козлов Д. В., Смирнов И. П.** Микросистемный емкостной датчик измерения физических величин. Пат. 2541415 РФ, МПК2014 G01D5/24, B81B7/02. АО "Российские космические системы". Заяв. 26.09.2013. Оpubл. 10.02.2015. Б. И. № 4. 8 с.
10. **Жуков А. А.** Физико-технологические основы получения полиимидных структур для микроэлектронных устройств, устройств микромеханики и микросенсорники: дис. ... докт. техн. наук. М., 2003.
11. **Корпухин А. С., Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Бабаевский П. Г.** Влияние условий формирования и толщины слоев на термодформационные характеристики полиимид-кремниевых упруго-шарнирных балок тепловых актюаторов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 2. С. 34—40.
12. **Веселаго В. Г., Жуков А. А., Корпухин А. С., Капустин А. В., Лаврищев В. П.** Способ изготовления метаматериала (варианты). Пат. 2522694 РФ, МПК2014 H01Q1/38. АО "Российские космические системы". Заяв. 07.09.2012. Оpubл. 20.07.2014. Б. И. № 20. 13 с.
13. **Datta M., Osaka T., Schultze J. W.** (Eds.). Microelectronic Packaging. CRC Press, Boca Raton, 2005. 564 p.
14. **Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Чашухин В. Г., Градецкий В. Г., Болотник Н. Н.** Микросистемный космический робот-инспектор (варианты). Пат. 2566454 РФ МПК2015 B25J 11/00, B64G 4/00. АО "Российские космические системы". Заяв. 11.03.2014. Оpubл. 27.10.2015. Б. И. № 30. 19 с.
15. **Смирнов И. П., Козлов Д. В., Корпухин А. С., Жуков А. А.** Микросистемное устройство управления поверхностью для крепления малогабаритной антенны Пат. 2456720 РФ, МПК2012 H01Q 1/28. АО "Российские космические системы". Заяв. 11.03.2011. Оpubл. 20.07.2012. Б. И. № 20. 15 с.
16. **Erdem E. Y., Chen Y. M., Mohebbi M., Darling R. B., Böhlinger K. F., Suh J. W., Kovacs G. T. A.** Thermally Actuated Omnidirectional Walking Microrobot // Journal of Microelectromechanical Systems. 2010. No. 19 (3). P. 433—442.
17. **Kälvesten E., Ebefors T., Mattsson J. U., Stemme G.** A walking silicon micro-robot // The 10th Int Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99), Sendai, Japan, 1999. P. 1202—1205.
18. **Смирнов И. П., Жуков А. А., Козлов Д. В., Корпухин А. С., Бабаевский П. Г.** Тепловой микромеханический актюатор и способ его изготовления. Пат. 2448896 РФ, МПК2012 B81B 3/00, B81C 1/00, B81B 7/00. АО "Российские космические системы". Заяв. 25.03.2012; Оpubл. 27.04.2012. Б. И. № 12.20 с.
19. **Khandpur R. S.** Printed circuit boards: design, fabrication and assembly. Tata McGraw-Hill Education. New Delhi, 2005. 704 p.

Prospects for Using Polyimide in Actuators of Mechatronic Microsystems

N. N. Bolotnik, bolotnik@ipmnet.ru✉, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation,
A. A. Zhukov, design-centre@spacecorp.ru, **D. V. Kozlov**, risc3@mail.ru,
A. S. Korpukhin, design-centre@spacecorp.ru, **I. P. Smirnov**, design-centre@spacecorp.ru,
Joint-Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, 111250, Russian Federation

Corresponding author: **Bolotnik Nikolay N.**, D. Sc., Head of Robotics and Mechatronics Department, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: bolotnik@ipmnet.ru

Received on December 04, 2015

Accepted on December 11, 2015

In this paper, well-known engineering solutions that are used in practice are analyzed in terms of utilizing polyimide in space microsystem devices. Possible applications are classified according to their functional roles. Advantages and disadvantages of using polyimide in modern engineering structures are discussed. Technological methods for forming polyimide layers are considered. The main aim of this study is to analyze and summarize the data about polyimide as a promising material for using in microsystem technologies for space applications. Polyimide possesses good mechanical and dielectric properties and has high coefficient of linear thermal expansion. In microsystem engineering, polyimide layers may find numerous applications. They can be used as dielectric coatings; hardening and protective coatings; thermal deformation layers; molded flexible films; separating layers with conductive interlayer buses; flexible joints and other components in micromechanics and micro-robotics; planarization layers; membranes and films; a supporting base for microelectronic components. Polyimide has high adaptability when used as functional layers in microsystem devices. Modern technologies for forming functional polyimide layers in microsystem engineering allow high-precision manufacturing of adhesion-strong design elements. Polyimide has high mechanical strength and is resistant to various destabilizing factors of space. These properties make polyimide prospective for using in space microrobotic devices. The use of polyimide in outer space is limited by the facts that this material is subject to etching in atomic oxygen in low near-earth orbits and that it is necessary to ensure stable adhesion of polyimide to structural materials of the devices.

Keywords: polyimide, membrane, micromechanics, microelectromechanical system, joint, torsion, coating, film, dielectric, actuator

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 14-19-00949.

For citation:

Bolotnik N. N., Zhukov A. A., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Smirnov I. P. Prospects for Using Polyimide in Actuators of Mechatronic Microsystems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 233–239.

DOI: 10.17587/mau/17.233-239

References

1. **Bessonov M. I., Koton M. M., Kudryavtsev V. V., Laius L. A.** *Poliimidy — klass termostoikikh polimerov* (Polyimides Are a Class of Heat-resistant Polymers), St-Petersburg, Nauka, 1983, 328 p. (in Russian).
2. **Panasuyk M. I., Novikov L. S. (Eds.)**. *Model' kosmosa. T. 2. Vozdeistvie kosmicheskoi sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov* (Model of Space. Vol. 2. The Influence of the Space Environment on Materials and Spacecraft Equipment), Moscow, KDU, 2007, 1144 p. (in Russian).
3. **Matveev V. V., Nikiforov A. P., Skurat V. E., Chalykh A. E.** *O mekhanizme vzniknoveniya sherokhovatosti poverkhnosti polimernykh materialov pri anizotropnom travlenii puchkom bystrogo atomarnogo kisloroda* (On the Nature of Surface Roughness of Polymer Materials Subject to Anisotropic Etching by a Beam of Fast Atomic Oxygen), *Khimicheskaya Fizika*, 1998, vol. 17, no 4., pp. 120–128 (in Russian).
4. **Maluf N., Williams K.** *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Boston, London, Artech House, Inc. 2004, 304 p.
5. **Basovskii A. A., Zhukov A. A., Anurova L. V., Kharitonov V. A.** *Sposob izgotovleniya shuntiruyushchego dioda dlya solnechnykh batarei kosmicheskikh apparatov* (A Method for Manufacturing Bypass Diodes for Spacecraft Solar Batteries), RF Patent No. 2411607 RF, MPK2011 H01L21/329. Byull. Izobter., no. 4, 2017 (in Russian).
6. **Korpukhin A. S., Kozlov D. V., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Peshekhontsev I. I.** *Vliyanie armirovaniya poliimidnogo sloya odnosnennymi uglerodnymi nanotrubbkami na termodeformatsionnye kharakteristiki poliimid-kremnievykh balok teplovykh mikroaktyuatorov* (The Influence of Reinforcing a Polyimide Layer by Single-walled Carbon Nanotubes on the Thermal Deformation Characteristics of Polyimide/Silicon Beams of Thermal Microactuators), *Materialovedenie*, 2011, no. 9, pp. 43–46 (in Russian).
7. **Ebefors T.** *Polyimide V-groove Joints for Three-Dimensional Silicon Transducers*, Ph. D. thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000, 144 p.
8. **Kozlov D. V., Smirnov I. P.** *Funktsional'nye vozmozhnosti univer-sal'nykh datchikov na osnove termomekhanicheskikh aktyuatorov* (The Performance Characteristics of the Multifunctional Sensors Based on Thermo-mechanical Actuators), *Innovatsii i Investitsii*, 2013, no. 5, pp. 191–193 (in Russian).
9. **Kozlov D. V., Smirnov I. P.** *Mikrosistemnyi emkostnoi datchik izmereniya fizicheskikh velichin* (Microsystem Capacitive Sensor for Measuring Physical Quantities), RF Patent 2541415, MPK2014 G01D5/24, B81B7/02. Byull. Izobter., no. 4, 2015 (in Russian).
10. **Zhukov A. A.** *Fiziko-tekhnologicheskie osnovy polucheniya poliimidnykh struktur dlya mikroelektronnykh ustroystv, ustroystv mikro-mekhaniki i mikrosensoriki* (Physical and Technological Fundamentals of Manufacturing Polyimide Structures for Microelectronic Devices, Micromechanical Devices, and Microsensors), D. Sc. (Eng.) Thesis, Moscow, 2003 (in Russian).
11. **Korpukhin A. S., Kozlov D. V., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Babaevskii P. G.** *Vliyanie uslovii formirovaniya i tolshchiny sloev na termodeformatsionnye kharakteristiki poliimid-kremnievykh uprugosharnirnykh balok teplovykh aktyuatorov* (Influence of the Conditions of Formation and the Thickness of Layers on the Thermal Deformation Characteristics of Polyimide Silicon Elastic-hinged Beams of Thermal Actuators), *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2011, no. 2, pp. 34–40 (in Russian).
12. **Veselago V. G., Zhukov A. A., Korpukhin A. S., Kapustyan A. V., Lavrishchev V. P.** *Sposob izgotovleniya metamateriala (varianty)* (A Method for Manufacturing a Metamaterial (Versions)), RF Patent 2522694, MPK2014 H01Q1/38. Byull. Izobter., no. 20, 2014 (in Russian).
13. **Datta M., Osaka T., Schultze J. W. (Eds.)**. *Microelectronic Packaging*. CRC Press, Boca Raton, 2005, 542 p.
14. **Kozlov D. V., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Chashchukhin V. G., Gradetsky V. G., Bolotnik N. N.** *Mikrosistemnyi kosmicheskii robot-inspektor (varianty)* (Microsystem Space Inspector Robot (versions)),

RF Patent 2566454 MPK2015 B25J11/00, B64G 4/00. Byull. Izobter., no. 30, 2015 (in Russian).

15. Smirnov I. P., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Zhukov A. A. *Mikrosistemnoe ustroystvo upravleniya poverkhnost'yu dlya krepleniya malogabaritnoi anteny* (Microsystem Device for Control of the Surface for Mounting a Compact Antenna), RF Patent 2456720, MPK2012 H01Q 1/28. Byull. Izobter., no. 20, 2012 (in Russian).

16. Erdem E. Y., Chen Y. M., Mohebbi M., Darling R. B., Böhlinger K. F., Suh J. W., Kovacs G. T. A. Thermally Actuated Omnidirectional Walking Microrobot, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, vol. 19, no. 3, pp. 433–442 (in Russian).

17. Kälvesten E., Ebefors T., Mattsson J. U., Stemme G. A Walking Silicon Micro-robot, *The 10th Int. Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '99)*, Sendai, Japan, 1999, pp. 1202–1205.

18. Smirnov I. P., Zhukov A. A., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Babaevsky P. G. *Teplovoi mikromekhanicheskii aktyuator i sposob ego izgotovleniya* (Thermal Micromechanical Actuator and a Technology for Manufacturing it), RF Patent 2448896, MPK2012 B81B 3/00, B81C 1/00, B81B 7/00, Byull. Izobter., no. 12, 2012 (in Russian).

19. Khandpur R. S. *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication and Assembly*. Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, 2005, 704 p.

УДК 621.865.8:62-231

DOI: 10.17587/mau.17.239-244

О. Д. Егоров, канд. тех. наук, доц., egorovod@yandex.ru, **М. А. Буйнов**, аспирант, mak5273@yandex.ru, Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

Структурный анализ механизмов мехатронных и робототехнических устройств

Предложен новый метод структурного анализа механизмов мехатронных устройств и роботов. Представлены формулы для аналитического определения числа избыточных и метрических связей, лишней подвижностей и лишней звеньев, возникающих в контурах механизмов. Показаны примеры структурного анализа механизмов и способы устранения выявленных избыточных связей, лишней подвижностей и лишней звеньев, а также метрических связей.

Ключевые слова: механизм, структурный анализ, избыточная связь, лишняя подвижность, метрическая связь, подвижность, степень подвижности

Введение

Мехатронные и робототехнические устройства находят широкое применение в различных областях техники [1–5].

Одним из важных этапов разработки мехатронных и робототехнических устройств является проектирование их механизмов, которые представляют собой системы твердых тел, подвижно связанных между собой различными видами связей, реализующие управляемые двигательные функции, т. е. осуществляющие преобразования управляемого движения одного или нескольких тел системы в требуемые управляемые движения других тел.

Под связями в механизмах понимают кинематические пары (КП), т. е. подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев. Каждая КП обладает определенной подвижностью.

Все КП можно условно разделить на пассивные и активные. Пассивная КП (в дальнейшем просто КП) — соединение двух звеньев, не позволяющее осуществлять заданное управляемое движение одного звена пары относительно другого. Активная КП (степень подвижности) позволяет сообщать одному из звеньев пары управляемые обобщенные координаты. Степень подвижности (СП) включает в себя приводы, сообщающие движения звену пары.

КП и СП имеют различную физическую сущность, и на структурных и кинематических схемах СП изображают иначе, нежели КП, но близкими к ним условными графическими изображениями [6].

Конструирование механизмов начинается с их структурного анализа. Основная задача такого анализа состоит в нахождении и устранении избыточных контурных связей (связей, которые не уменьшают подвижность механизма, а лишь обращают его в статически неопределимую систему [7]) (ИКС), лишней контурных подвижностей (возможностей звена поворачиваться вокруг своей продольной оси или нескольких звеньев — вокруг их общей оси, не оказывая влияния на функциональные возможности механизма) (ЛКП), лишней звеньев (звеньев, которые не оказывают влияния на его функциональные возможности, но влияют на качество работы) (ЛЗ) и метрических связей (связей, которые повторяют ограничения на относительные движения звеньев в механизме [8]) (МС).

Существующие методы структурного анализа не всегда позволяют корректно определять ИКС, ЛКП механизма, а ЛЗ и МС до настоящего времени не определяли [9, 10]. Поэтому предлагается иной подход к структурному анализу механизмов, позволяющий гарантированно их определять, для рационального конструирования механизмов мехатронных и робототехнических устройств.

Структурные формулы механизмов

Аналитическую зависимость между подвижностью механизма и его структурными параметрами называют структурной формулой.