

А. В. ВОРОБЬЕВ<sup>1</sup>, к. т. н. В. Д. ЖОРА<sup>2</sup>, К. К. БАКЛАЕВ<sup>3</sup>, В. П. ГРУНЯНСКАЯ<sup>2</sup>

Россия, г. Красногорск, Московской обл. <sup>1</sup>НПП «Поликом»;  
Украина, г. Киев, <sup>2</sup>НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАН Украины,  
г. Львов, <sup>3</sup>НПП звукотехники и информационных систем  
E-mail: vdzhora@ukrpost.net

## БЕЗАДГЕЗИВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ НА ПОЛИИМИДНОЙ ОСНОВЕ

*Рассмотрена технология изготовления безадгезивных акустических мембран из фольгированных диэлектриков типа «алюминий–полиимид», а также их преимущества в сравнении с мембранами на лавсановой основе.*

*Ключевые слова: акустическая система, звуковой излучатель, мембрана, полиимидная пленка.*

В акустических системах различного типа в качестве звуковых излучателей широко применяются мембраны, изготовленные с использованием полимерных пленок, чаще всего из майлара (он же полиэтилентерефталат или лавсан). Акустические мембраны представляют собой тонкую (толщиной в сотые доли миллиметра) эластичную пленку, на которой расположены проводники различной формы в зависимости от принципа работы излучателя звука. В электростатических излучателях они представляют собой несколько изолированных друг от друга металлизированных полос, в изодинамических — проводящие дорожки типа меандра, в ортодинамических — проводник в виде спирали.

К достоинствам планарных звуковых излучателей, в которых используются такие мембраны, относятся:

- широкий диапазон воспроизводимых частот (от 100 и меньше Гц до 30 и более кГц);

- малые нелинейные искажения за счет очень малого веса мембраны, чем обеспечивается ее практическая безынерционность в сравнении с иными типами излучателей;

- высокая точность воспроизведения звука, его прозрачность, естественность и реалистичность в широком диапазоне частот.

Однако надежность мембран и технические характеристики звуковых излучателей на их основе определяются не только свойствами майларовых пленок, но во многом зависят и от свойств адгезива, в частности от величины его адгезии к майлару и к алюминиевым проводникам, его термостойкости и т. п. Правильный выбор адгезива, его толщины и обеспечение равномерности нанесения определяют качество фольгированного диэлектрика и, следовательно, изготовленных из него изделий. Так, например, при малой толщине адгезива ухудшается сцепление полимера с металлом, а при слишком большой возможно образование гофр и изломов в слое

металла. Следует отметить сравнительно невысокую термостойкость адгезивов, что сказывается на общей термостойкости изделий. Также слой адгезива уменьшает эластичность и упругость склеенного с его применением материала, что не может не сказаться в дальнейшем на качестве воспроизведения звука. Очевидно, что акустические мембраны, выполненные без применения адгезива, намного выигрывали бы по своему качеству.

В электронике при изготовлении гибких носителей для сборки микросхем, гибких плат и шлейфов широко применяются фольгированные материалы на полиимидной основе (пленке). Важно отметить, что полиимидные пленки характеризуются ценнейшим комплексом свойств:

- более высокими в сравнении с другими полимерами механической прочностью, эластичностью и термостойкостью [1];

- высокой электрической прочностью (280 — 300 кВ/мм) [1];

- малой плотностью [2];

- относительно высокой теплопроводностью [3], что важно для уменьшения вероятности перегрева мембран при большой мощности звуковых излучателей;

- позволяют получать безадгезивные фольгированные материалы [4].

Настоящая статья посвящена описанию разработанной нами технологии изготовления безадгезивных акустических мембран с использованием в качестве полимерной основы полиимидных пленок, сформированных на алюминиевой фольге. В настоящее время такие мембраны другими производителями не выпускаются.

Конструктивно мембраны для изодинамических или ортодинамических аудиосистем представляют собой проводники из алюминия толщиной от 14 до 25 мкм, расположенные на полиимидной пленке. Как уже отмечалось, форма проводников может быть различной, например

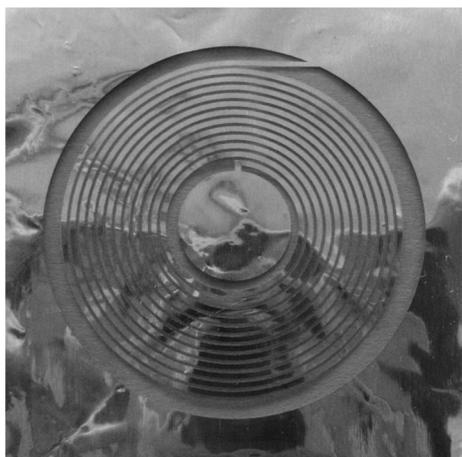


Рис. 1. Акустическая мембрана ВЧ-излучателя на полиимидной основе

в виде меандра или спирали (рис. 1), и задается фотошаблонами. В зависимости от конструкции акустических систем размеры мембран могут составлять от 34×34 до 200×400 мм. Толщина полиимидной пленки (основы мембран) обычно составляет 10–20 мкм.

Технологический процесс изготовления акустических мембран на полиимидной основе включает в себя такие основные операции, как:

- подготовка поверхности фольги;
- формирование слоя полиимидной пленки на фольге;
- термообработка фольгированного диэлектрика;
- нанесение фоторезиста;
- экспонирование;
- проявление;
- травление слоя алюминия;
- снятие фоторезиста или зачистка контактов;
- контроль и измерение сопротивления.

Подготовку поверхности фольги проводят в соответствии с рекомендациями, приведенными в [4]. Для этого металлическую фольгу предварительно подвергают очистке и обезжириванию в этиловом спирте и парах трихлорэтилена для улучшения смачиваемости поверхности фольги жидкими полиимидным лаком и фоторезистом при их нанесении.

Формирование слоя полиимидной пленки на фольге [4] проводят на специализированной установке рулонным методом. Для нанесения жидкого лака используют щелевые фильеры, обеспечивающие равномерность толщины лакового покрытия не хуже ± 2 мкм по всей ширине материала. Сушку нанесенного лака проводят в сушильной камере при постепенном ступенчатом повышении температуры от комнатной до 100°C. Щелевая фильера и сушильная камера представляют собой единую поливочно-сушильную машину.

Термообработку полученного фольгированного диэлектрика проводят с целью достиже-

ния степени полимеризации (имидизации) нанесенной лаковой пленки до 95–100%. Для этого металлическую фольгу со сформированным полиимидным покрытием сматывают в рулон вместе с прокладочной полимерной лентой коррекса, помещают в вакуумные сушильные камеры или вакуумные печи, проводят предварительную ступенчатую термообработку при температурах от 120 до 230°C до степени полимеризации полиимидного покрытия 60–70%, после чего осуществляют окончательную сушку при температуре 295–350°C до заданной степени полимеризации [4].

В технологическом процессе изготовления акустических мембран используется негативный фоторезист ФН-11С на основе циклокаучука с бисазидом, образующий на гибких подложках эластичный защитный рельеф, стойкий к многократным перегибам. При нанесении фоторезиста, осуществляемого методом погружения, используется ранее разработанная методика [5]. Ее применение обеспечивает получение оптимальной толщины светочувствительного слоя порядка 1,5 мкм в диапазоне рабочих температур и при различных значениях вязкости фоторезиста, допускаемых техническими условиями на него. При этом требуемую скорость движения диэлектрика  $U_{тр}$  в зависимости от вязкости фоторезиста определяют по графику, полученному экспериментально (рис. 2). Нанесение и сушку фоторезистивного слоя по стандартным режимам проводят на специализированной установке также рулонным методом.

Далее фольгированный диэлектрик с нанесенным фоторезистом разрезают на отдельные заготовки.

Экспонирование светочувствительного слоя проводят на установке двухстороннего экспонирования «Экспонир-202» групповым методом, при этом применяются пленочные фотошаблоны.

Перед проявлением заготовки закрепляют на специальных металлических рамках, стойких к действию технологических растворов. Проявление защитного рельефа проводят после-

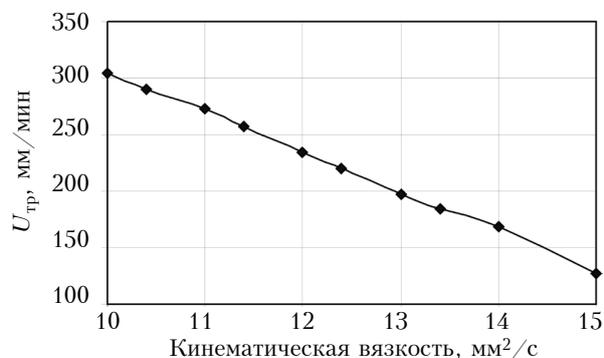


Рис. 2. Зависимость скорости движения диэлектрика от кинематической вязкости фоторезиста

довательно в трех порциях уайт-спирита с последующей промывкой в бутилацетате и сушкой в потоке теплого воздуха. Термическое дубление полученного при проявлении защитного рельефа проводят в сушильном шкафу при температуре  $120 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение часа.

Локальное травление слоя алюминия проводят групповым методом в специально подобранном кислотном травящем растворе.

При необходимости удаление фоторезиста проводят после предварительного замачивания в ксилоле путем обработки в горячем форсане-2 и последовательной промывки в ксилоле и бутилацетате. На некоторых изделиях проводить операцию удаления фоторезиста не требуется. В таком случае его удаляют локально только с

контактных площадок, которые используют для контроля сопротивления мембран и для пайки проводников.

При контроле качества мембран проверяют полноту вытравливания алюминия в дорожках травления и при необходимости с помощью иглы удаляют единичные закоротки между элементами без нарушения целостности полиимидной основы.

Затем с помощью приборов измеряют сопротивление готовых мембран, которое в зависимости от их конструкции может составлять от единиц до десятков Ом при точности воспроизведения не хуже  $\pm 5\%$ .

Из данных **табл. 1** видно, что технические характеристики полиимидной основы существенно

Таблица 1

Технические характеристики полимерной основы акустических мембран

Тип полимера	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при растяжении, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Диапазон рабочих температур, °С
Полиимид	150–180	60	0,14–0,20	-60 ... +220
Лавсан	90	15	0,15	-20 ... +100

Таблица 2

Технические характеристики ВЧ-головки 10ГИ-1

Основа мембраны	Рабочий диапазон частот, кГц	Уровень чувствительности, дБ/(Вт·м)	Максимальная электрическая мощность, Вт	Коэффициент гармонических искажений при звуковом давлении 94 дБ, не более, %	Максимальный уровень звукового давления, дБ
Полиимид	2–37	88,5	30	0,5	103
Лавсан	2–35	88,3	10	1,3	97

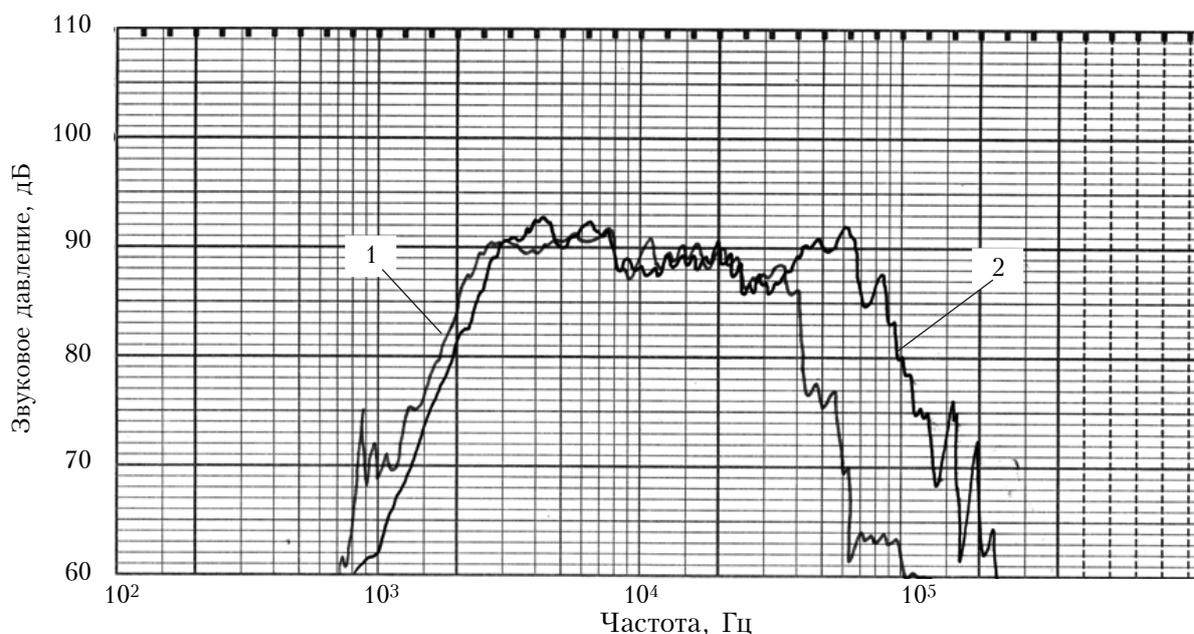


Рис. 3. АЧХ изодинамической ВЧ-головки с мембранами диаметром 34 мм на полиимидной основе при различных значениях толщины алюминия и полиимида (ПИ):  
1 – Al 14 мкм, ПИ 14 мкм; 2 – Al 10 мкм, ПИ 12 мкм

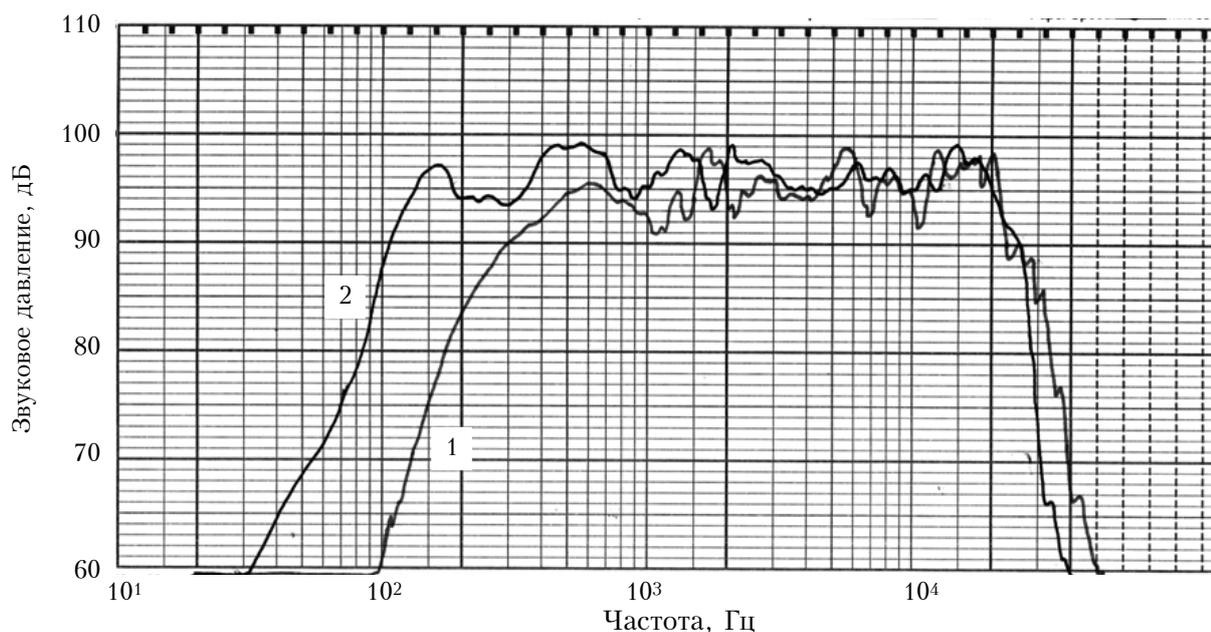


Рис. 4. АЧХ изодинамической ВЧ-головки размером 300×110 мм с мембранами на полиимидной основе при различных значениях толщины алюминия и полиимида (ПИ):  
 1 — Al 14 мкм, ПИ 14 мкм; 2 — Al 20 мкм, ПИ 20 мкм

превосходят параметры лавсановой пленки, благодаря чему увеличивается надежность и срок службы аудиосистем, улучшается технологичность процесса пайки проводников к мембранам при монтаже систем. Важно также отметить, что исключение адгезива из конструкции акустических мембран положительно сказывается и на качестве их звучания. Например, используя тонкую полиимидную пленку толщиной 10–12 мкм удалось изготовить высокочастотную головку громкоговорителя с максимальной рабочей частотой 120 кГц. При этом звук становился не только более естественным, но и значительно улучшились его пространственные характеристики — фокусировка и локализация.

Зависимости амплитуды звукового давления акустических мембран от частоты (АЧХ) измеряли гетеродинным анализатором спектра 2010А фирмы «Брюль и Кьер» (Дания) с микрофонами 4149, 4135 и самописцем 2037, позволяющим исследовать частотные характеристики в диапазоне частот от 2 Гц до 200 кГц. Измерения проводились в звукозаглушенной камере акустической лаборатории НПП «Звукотехники и информационных систем» (г. Львов).

АЧХ изодинамической высокочастотной головки громкоговорителя 10ГИ-1 с мембранами на полиимидной и на майларовой основах, выполненными с одинаковой топологией и толщиной алюминиевой фольги, отличаются незначительно. Они определяются в большей степени акустическим дизайном головки, который не изме-

нился. А вот динамические и мощностные характеристики головки в случае использования полиимидной основы значительно улучшились (табл. 2).

Для демонстрации влияния конструктивных особенностей на характеристики акустических преобразователей на рис. 3 и 4 приведены АЧХ акустических излучателей двух типов. Здесь видно, что изменяя толщину материала, можно влиять на частотный диапазон как высокочастотных, так и низкочастотных устройств.

Авторами организован серийный выпуск безадгезивных акустических мембран на полиимидной основе в НПП «Поликом» (г. Красногорск). Исследования первых образцов мембран и изделий с их использованием, а также совершенствование конструкции и технологии изделий проводились в течение нескольких лет.

С использованием низкоомных акустических мембран на полиимидной основе этим же предприятием совместно с НПП звукотехники и информационных систем выпускается ряд уникальных автомобильных изодинамических систем, в том числе изодинамический сабвуфер, широкополосные изодинамические домашние системы. Применение безадгезивных акустических мембран позволило увеличить чувствительность небольшой (400×1100 мм) широкополосной изодинамической Hi-End системы 150 АСИД-007 с 85 до 97 дБ/(Вт·м), а нижнюю граничную частоту уменьшить с 200 до 70 Гц при практически том же конструктиве.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. – Ленинград: Наука, 1983.
2. Борщев В.Н., Листратенко А.М., Антонова В.А. и др. Светодиодные модули на основе алюминиевой «chip on flex» (COF) технологии // Світлотехніка та електроенергетика. – 2008. – № 4. – С. 31 – 37.
3. Плис Н.И., В Вербицкий.Г., Жора В.Д. и др. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 5–6. – С. 43–45.

4. Патент России 2240921. Способ получения полиимидного материала / В.Н.Воробьев, А.В.Воробьев. – Оpubл. 27.11.2004.

5. Жора В.Д., Шеревеня А.Г., Донцова В.В. и др. Нанесение фоторезистивного слоя в процессе рулонного изготовления гибких носителей для сборки ИС // Электронная техника. Сер. 7, ТОПО. – 1988. – Вып. 3. – С. 5 – 8.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 15.09 2013 г.

А. В. ВОРОБЬЮВ, В. Д. ЖОРА, К. К. БАКЛАЄВ, В. П. ГРУНЯНСЬКА

Росія, м. Красногорськ, Московська обл., НВП «Поліком»;  
Україна, м. Київ, НДІ мікроприладів НТК «ІМК» НАН України;  
м. Львів, НВП Звукотехніки та інформаційних систем  
E-mail: vdzhora@ukrpost.net

БЕЗАДГЕЗИВНІ АКУСТИЧНІ МЕМБРАНИ НА ПОЛІМІДНІЙ ОСНОВІ

*Розглянуто технологію виготовлення акустичних мембран з фольгованих діелектриків типу «алюміній – поліімід» та переваги таких мембран у порівнянні з іншими звуковими випромінювачами.*

*Ключові слова: акустична система, звукові випромінювачі, мембрана, поліімідна плівка.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.1.42  
UDC 681.84.081.5

A.V.VOROB'EV<sup>1</sup>, V. D. ZHORA<sup>2</sup>,  
K. K. BAKLAEV<sup>3</sup>, V. P. GRUNYANSKAYA<sup>2</sup>

Russia, Krasnogorsk, <sup>1</sup>Research and Production Company “Polycom” LLC;  
Ukraine, Kiev, <sup>2</sup>State enterprise “RI of Microdevices”  
STS “Institute of Single Crystals” NAS of Ukraine;  
Lvov, <sup>3</sup>Subsidiary of public stock company  
“Scientific Research Institute of Consumer Electronic Equipment  
“Research and manufacturing Company for audio and IT systems”  
E-mail: vdzhora@ukrpost.net

NONADHESIVE ACOUSTIC MEMBRANES BASED ON POLYIMIDE

*The paper presents a comparison of technical characteristics of acoustic membranes with an adhesive layer and nonadhesive membranes. The authors present the manufacturing technology for acoustic membranes based on aluminum-polyimide film dielectrics and analyze the advantages of such membranes in comparison to other sound emitters.*

*Keywords: acoustic system, sound emitters, membrane, polyimide film.*

REFERENCES

1. Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Laius L.A. *Poliimidy – klass termostoikikh polimerov* [Polyimides – a class of heat-resistant polymers] Leningrad, Nauka, 1983, 328 p. (in Russian)
2. Borshchev V.N., Listratenko O.M., Antonova V.A., Protsenko M.A., Tymchuk I.T., Kostyshyn Y. Y. [LED modules on the basis of aluminium «Chip on flex» (COF) technique] *Svitlotekhnika ta elektroenergetika*, 2008, no 4, pp. 31-37 (in Russian).

3. Plis N. I., Verbitsky V. G., Zhora V. D., Volnistov V. N., Grunyanakaya V. P., Sergeyeva N. N. [The technology of microcircuit assembly on flexible polyimide substrate] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2010, no 5–6, pp. 43-45. (in Russian)

4. Russian Patent 2240921 [A method for producing a polyimide material] 27.11.2004.

5. Zhora V.D., Sherevenya A.G., Dontsova V.V. et al. [Application of the photoresist layer in the process of roll manufacturing of flexible carrier for IC assembly] *Elektronnaya tekhnika*, Ser. 7, TOPO, 1988, iss. 3, pp. 5-8. (in Russian)