

ТЕХНОЛОГИЯ, ПРОИЗВОДСТВО, ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ РЭА

УДК 531.781.2

*В.Г. КОТУХ, канд. техн. наук, К.Ю. ХАРЕНКО, канд. техн. наук,
М.А. МИРОШНИК, д-р техн. наук, Ю.В. ПАХОМОВ*

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАКОФОЛЬГОВЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В ДАТЧИКАХ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Введение

Одним из преимуществ полупроводниковых интегральных преобразователей считается возможность применения технологий микроэлектроники для производства датчиков измерения физических величин. При этом отработанные технологии изготовления интегральных микросхем преимущественно использовались при создании датчиков только механических величин – давлений и ускорений. Постепенно технологии производства, основанные на достижениях микроэлектроники и, в частности, процесса фотоэлектронной литографии, позволили получить преобразователи с исключительно малыми размерами и массой, которые охватили весь спектр первичных преобразователей физических величин: магнитных, термических и химических. Темпы роста объемов производства датчиков, изготавливаемых по микроэлектронной технологии, превзошли темпы роста производства обычных интегральных схем, как следствие существенного сокращения трудозатрат на производство одного датчика и уменьшения его стоимости [1]. Традиционные технологии в процессе развития этого перспективного направления развития микроэлектроники, постепенно трансформировались с учетом специфических требований, предъявляемых к средствам измерений. Появление новых специализированных технологий изготовления датчиков измерения физических величин оказало решающее влияние на их конструкции и выбор материалов, совместимых с технологией производства полупроводниковых чувствительных элементов. В современных технологиях производства датчиков измерения физических величин, в том числе для газового оборудования и трубопроводных систем (ГПиТС), оказалось много общих с производством интегральных микросхем операций, позволяющих значительно уменьшить трудоемкость изготовления и стоимость датчиков.

При проектировании изделий микроэлектроники, в силу значительной трудоемкости и стоимости, особое внимание уделялось вопросам технологичности сборочных операций, в том числе электрической коммутации миниатюрных элементов, являющейся доминирующим источником отказов изделий. Кроме того, такая коммутация должна обеспечивать возможность контроля функционирования элементов на всех стадиях сборки, поскольку первичные преобразователи физических величин являются, как правило, неремонтируемыми изделиями со сложной компоновкой элементов конструкции внутри объема датчика, предназначенного, в том числе, для работы в экстремальных условиях эксплуатации. Перспективным направлением в решении ряда проблем при их проектировании представляется многофункциональное использование гибких плат и микрокабелей на основе лакофольговых диэлектриков, и в первую очередь, пленочной композиции алюминий–полиимид, а также создание специализированных технологических процессов их изготовления.

Элементы коммутации на основе лакофольговых диэлектриков в датчиках измерения физических величин

Опыт производства и использования в микроэлектронике изделий на основе пленочной композиции алюминий–полиимид в качестве элементов коммутации бескорпусных микросхем насчитывает не одно десятилетие. Основные виды изделий – ленточные носители бес-

корпусных микросхем, слои гибридных микросборок на жестком основании и плоские кабели [2 – 5].

Анализ публикаций показывает, что пленочная композиция алюминий – полиимид в последнее время находит широкое применение в различных преобразующих модулях, к которым предъявляются жесткие требования по надежности, минимизации рабочего объема и массы: кремниевых детекторных модулях для экспериментальных исследований в области высоких энергий [6]; модулях солнечных фотопреобразователей [7]; тензометрических модулях первичных преобразователей теплоэнергетических параметров [8].

При выборе материала для изготовления кабелей и плат прежде всего принимаются во внимание требования по минимизации количества материала внутри рабочего объема, а также требования к сопротивлению, взаимной емкости проводников, электрической прочности и эластичности. Поэтому выбор в пользу фольгированного алюминием полиимида в конструкциях датчиков измерения физических величин продиктован рядом свойств, и соответственно преимуществ, этой бинарной структуры. При малой плотности алюминиевой фольги ($2.7г/см^3$) обеспечиваются высокая электропроводность ($0,028мкОм·м$) и теплопроводность ($218 Вт/(м·К)$) при хорошей пластичности и коррозионной стойкости. В свою очередь полиимид, как диэлектрик, при высоких значениях удельного объемного сопротивления $10^{15} Ом·м$ и электрической прочности $200МВ/м$ имеет достаточно высокую механическую прочность и стойкость к многократным изгибам (при комнатной температуре значения предела прочности при растяжении $17,5кгс/мм^2$ и модуля упругости $303кгс/мм^2$) [9].

Возможность избирательного травления для формирования топологического рисунка любой конфигурации элементов, как по алюминию, так и по полиимиду; высокая прочность на разрыв и изгиб; стойкость к трению; отсутствие существенных газовыделений в вакууме при высоких температурах, химическая и радиационная устойчивость; способность неоднократно изгибаться и свертываться в трех плоскостях; принимать форму корпуса сложной конфигурации также являются важнейшими технологическими характеристиками для эффективного использования алюминий – полиимидных пленок в датчиках измерения физических величин.

В настоящее время в технологии гибких плат тенденции дальнейшего развития определяются повышением требований к плотности элементов и компонентов в таких датчиках.

Алюминий-полиимидные пленки в датчиках измерения физических величин

Вышеперечисленные характеристики, в совокупности с технологическим базисом изготовления ленточных носителей микросхем и гибридных микросборок, уже в настоящее время позволяют эффективно использовать изделия из материалов ФДИ–А (БГУО.037.042 ТУ) в качестве элементов коммутации в датчиках измерения физических величин, в т. ч. в ГОиТС [8].

Переход на коммутацию с использованием кабельной перемычки на основе бинарной структуры алюминий-полиимид в конструкции трехпараметрового (давление – ускорение – температура) датчика (рис.1), позволил: существенно сократить количество электрических соединений по сравнению с проволочной коммутацией; обеспечить точность совмещения выводов кабеля с контактными площадками микросхем; решить проблемы пространственного размещения компонентов.

В конструкции методами селективного травления алюминия сформированы токопроводящие дорожки шириной 100 мкм с шагом от 80 мкм, контактные площадки под операции сварки и пайки, а также верхний экранирующий слой, несущий информационную функцию (заводской номер изделия, обозначения выходных контактных клемм на разъеме, товарный знак) [10].

Формообразование полиимидной основы осуществлялось элементами перфорации.

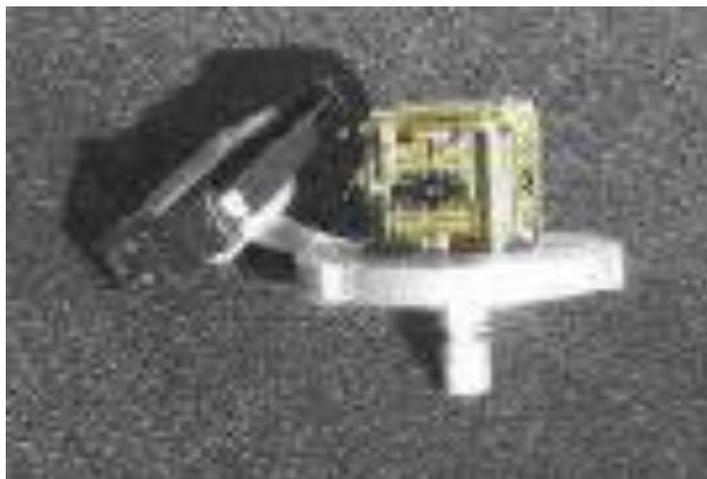


Рис.1. Внешний вид кабельной перемычки в конструкции трехпараметрового датчика

Для уменьшения переходных сопротивлений и припайки SMD-компонентов и других элементов коммутации в основных цепях и схемах регулировки предусмотрено формирование покрытий из никеля (толщиной до 3 мкм), а также припойных покрытий – олово-висмут (толщиной до 10 мкм). Топологические эскизы кабельной перемычки показаны на рис.2.

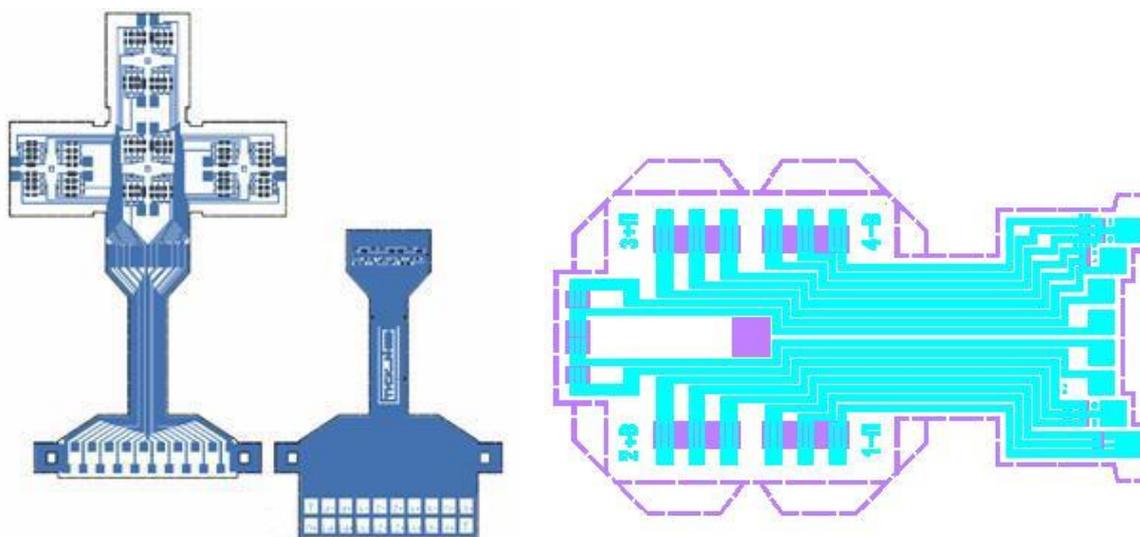


Рис.2. Топологические эскизы элементов конструкции кабельной перемычки трехпараметрового датчика

Расчет геометрических параметров и проектирование основных элементов конструкции кабельной перемычки осуществлялся исходя из текущих возможностей технологии гибридных микросборок на основе полиимидного носителя [7], при этом надежность совмещения отдельных слоев с контактными площадками микросхем рассчитывалась по методике, приведенной в работе [11].

Методы контроля электрических параметров кабельных перемычек в датчиках измерения физических величин

Любой датчик измерения физических величин должен обеспечивать гарантированные метрологические характеристики на протяжении всего срока эксплуатации, не ухудшая технические характеристики инженерного объекта, на котором он установлен [12]. Требования к надежности и качеству функционирования датчика распространяются и на отдельные элементы его конструкции. Это предполагает разработку методологии контроля отдельных параметров-критериев, как для оценки качества и стабильности технологических процессов их изготовления, так и сбора информации для последующего проектирования.

Токопроводящий слой алюминия в кабельных перемычках подвержен электромиграции, приводящей к росту сопротивления и даже к разрыву контактов [13]. Для алюминия характерно явление ползучести, приводящее к появлению усталостных трещин [14], которая со временем в процессе эксплуатации может проявляться даже при низких уровнях токовой нагрузки. В качестве параметров-критериев, надежность и качество функционирования токопроводящих слоев, предлагаются значения поверхностного сопротивления R_s проводниковых структур (алюминий, алюминий-никель, алюминий-никель-олово/висмут), эффективной ширины токопроводящих дорожек W , сопротивлений R межслойных сварных и паяных соединений.

Контроль сварных и паяных соединений как правило базируется на четырехзондовом методе измерения, исключающем влияние на результат измерений сопротивлений подводящих проводов и контактных переходов. При этом контролируются сопротивления сварного межслойного соединения алюминий-алюминий и паяного соединения навесной компонент (SMD)-олово/висмут-никель-алюминий. Результаты климатических испытаний кабельных перемычек, с целью выявления скрытых дефектов в межслойных соединениях, представлены на рис. 3.

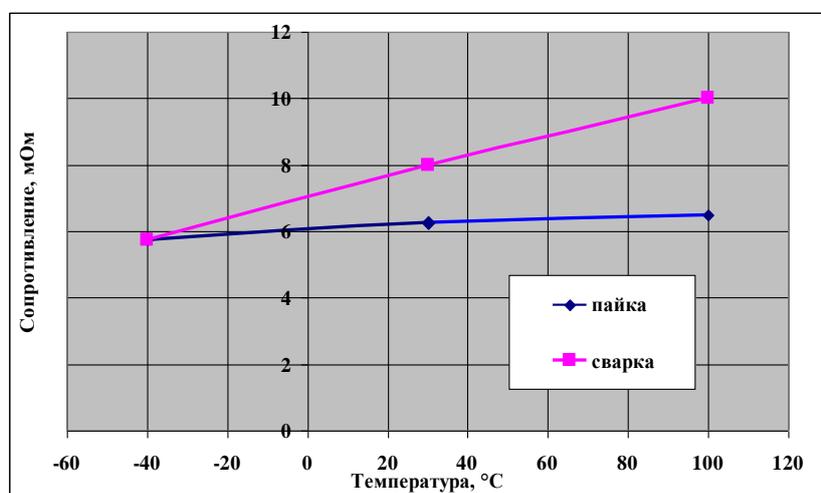


Рис.3. Температурные зависимости сопротивлений межслойных соединений

Для контроля поверхностного сопротивления R_s токопроводящих структур алюминий, алюминий-никель, алюминий-никель-олово/висмут и эффективной ширины токопроводящих дорожек W использовались широко известные в микроэлектронике структуры Ван-дер-Пау [15] (рис. 4).

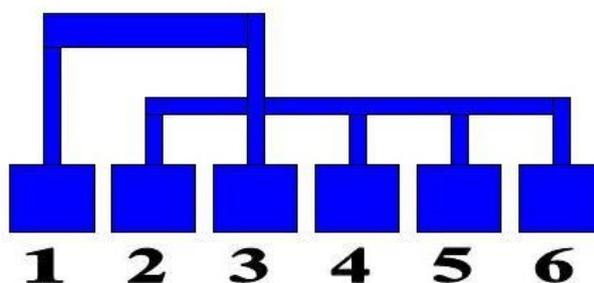


Рис. 4. Тестовая структура Ван-дер-Пау

Значения параметров-критериев рассчитывались по следующим формулам: поверхностное сопротивление R_s не зависит от размера структуры:

$$R_S = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{\Delta U_1}{I}, \quad (1)$$

где I – ток, протекающий от контакта 1 к контакту 6; ΔU_1 – разность потенциалов между контактами 2 и 3;

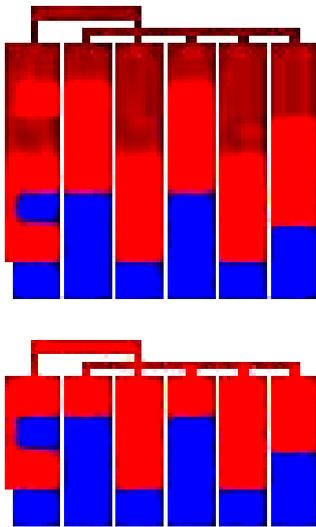
эффективная ширина токопроводящей дорожки

$$W = R_S L \frac{I}{\Delta U_2}, \quad (2)$$

где L – длина токопроводящей дорожки между контактами 4 и 5; ΔU_2 – разность потенциалов между контактами 4 и 5.

Структуры Ван-дер-Пау могут размещаться как в технологической зоне изделий из фольгированного полиимида или любого другого фольгированного диэлектрика, так и по полю заготовок-спутников, изготавливаемых в едином технологическом цикле с основными изделиями.

Метод Ван-дер-Пау открывает возможности для измерения параметров токопроводящих структур, большей частью не доступных для контроля в готовых кабельных перемычках. На рис. 5 приведен вариант тестов для трех- и двухслойных структур. В этом случае появляется возможность контролировать не только выбранные нами параметры-критерии, но и простым



перебором доступа к каждому из слоев в зоне контактных площадок, менять путь и направление протекания тока, а значит, кроме собственно сопротивлений слоев и их сочетаний, контролировать сопротивление контактных переходов. Измерения и отбраковку в этом случае можно производить на серийно выпускаемых зондовых установках до дорогостоящих сборочных операций. При проектировании новых изделий и отработке технологических процессов их изготовления целесообразно практиковать сбор информации по результатам контроля тестовых структур на заготовках-спутниках (рис. 6).

Для определения и экстраполяции зависимостей параметров-критериев от геометрических размеров элементов, варьировалась ширина токопроводящих дорожек, а также с постоянным шагом менялось расположение структур по полю заготовки для оценки воспроизводимости их геометрических и электрофизических характеристик.

Рис. 5. Тесты Ван-дер-Пау для многослойных структур

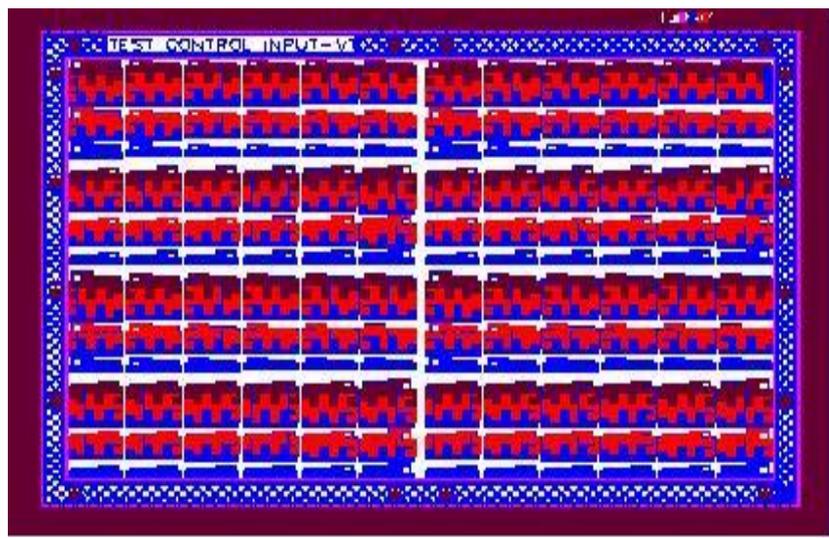


Рис. 6. Топологический эскиз заготовки-спутника со структурами Ван-дер-Пау

Выводы

Совершенствование технологий обработки фольгированных диэлектриков для датчиков измерения физических величин проводилось преимущественно с учетом общей тенденции развития микроэлектроники – увеличения плотности монтажа электронных компонентов, что является важным, но не определяющим показателем для датчиковой аппаратуры, с ее относительно простой схмотехникой и доминирующей ролью метрологических и надежность характеристик изделий. Поэтому целенаправленное проектирование элементов конструкции датчиков с ориентацией на фольгированные диэлектрики и соответствующего технологического базиса позволит получить целый ряд конструкторско-технологических решений для создания кабельных перемычек специального назначения, электро- и теплоизоляторов; защитных и воспринимающих мембран, ключей цепей регулировки, экранов помехозащиты, клапанов, сопел, уплотнительных прокладок; этикеток и т.п.

Проведенный анализ современного состояния и перспектив развития технологий в области применения гибких фольгированных диэлектриков, а также теоретические и экспериментальные исследования по созданию кабельных перемычек на основе алюминий – полиимидных пленок для датчиков измерения физических величин, позволяют сделать ряд выводов.

Технологический базис для производства ленточных носителей микросхем и гибридных микросборок уже в настоящее время широко используется при проектировании различных преобразующих модулей.

Фольгированные диэлектрики в конструкциях датчиков измерения физических величин используются разработчиками преимущественно в качестве элементов коммутации на основе бинарной структуры алюминий-полиимид.

Особые требования, предъявляемые к элементам конструкции датчиков, предполагают разработку новой методологии контроля параметров изделий из лакофольговых диэлектриков для оценки качества и стабильности технологических процессов их изготовления, сборки и монтажа.

В качестве параметров-критериев надежности и качества функционирования токопроводящих слоев фольгированных диэлектриков предлагаются значения поверхностного сопротивления проводниковых структур, эффективной ширины токопроводящих дорожек, сопротивлений межслойных сварных и паяных соединений.

Контроль предлагаемых параметров-критериев должен базироваться на четырехзондовом методе измерения с использованием тестовых структур Ван-дер-Пау.

Разработаны и экспериментально опробованы конструкции тестовых структур и методы расчета параметров-критериев.

Разработка конструкций, методологического и технологического базиса для изготовления датчиков измерения физических величин с использованием лакофольговых диэлектриков позволит существенно расширить область их применения в конструкциях датчиков с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Список литературы: 1. Ваганов, В.И. Сравнение микроэлектронных тензопреобразователей механических и тепловых величин на базе микроэлектроники / В.И. Ваганов. – М. : Издательство МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1994 – 220с. 2. Мейхин. Гибкие кабели как основной элемент монтажа устройств // Электроника (США). – 1973. – №14. – С. 46 – 48. 3. Бергер. Гибкий плоский кабель для подключения интегральных схем / Бергер, Байлендер // Электроника (США). – 1973. – № 7. – С. 50 – 51. 4. Плаксин, Г.А. Применение гибких печатных плат (шлейфов) для внутриблочного монтажа в микроэлектронной аппаратуре / Г.А. Плаксин, В.В. Марков, В.Н. Стукалов // Электронная техника. Сер.11. Комплексная микроминиатюр. Радиоэлектрон. Устройств и систем. – 1976. – Вып.1 (5). – С. 18 – 50. 5. Лайман, С. Гибкие схемы – новое средство конструирования аппаратуры // Электроника – 1977. – № 19. – С. 24-36. 6. Alice, *Technical Design Report of the Inner Tracking System (ITS)*, CERN/LHCC 99 – 12, ALICE TDR 4, 18 June 1999. 7. Борщев, В.Н., Модуль фотопреобразователей на основе полиимидного носителя для солнечных батарей космического применения / В.Н. Борщев, В.А. Антонова, А.М.

Листратенко, И.Т. Тымчук // Технология приборостроения. – 2002. – №1. – С. 19-21. 8. *Костышин, Я.Я.* Многопараметровые кремниевые интегральные датчики физических величин с элементами коммутации на основе пленочного фольгированного полиимида / Я.Я. Костышин, В.Е. Старков, К.Ю. Харенко // Технология приборостроения. – 2004. – № 2. – С.11–15. 9. *Бюллер, К.У.* Тепло- и термостойкие полимеры ; под ред. Я.С.Выгодского. – М. : Химия, 1986. – 158с. 10. *Невлюдов, И.Ш.* Проектные решения повышения надежности кремниевых интегральных преобразователей механических величин / И.Ш. Невлюдов, М.А. Омаров, К.Ю. Харенко // Радиотехника. – 2006. – № 147. – С. 119–123. 11. *Иващенко, Е. А.* Контроль параметров изделий микроэлектроники с применением контактирующих устройств с фольгированных диэлектриков / Е.А. Иващенко, В. А. Сусликов, К. Ю. Харенко, С.Н. Пашенко // Технология приборостроения. – №2. – 2007.– С.51-54. 12. *Мокров, Е. А.* / Е. А. Мокров, В. В. Рыжак // Радиотехника. – 1995. – №10. – 38 с. 13. *Фомин, А.В.* Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок / А.В. Фомин, Ю.А. Боченков, В.А. Сорокопuz. – М. : Радио и связь, 1981. – 352с. 14. *Геллер, Ю.А.* Материаловедение / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. – М. : Металлургия, 1983. – 455с. 15. *Павлов Л.П.* Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – М. : Высш. шк., 1987. – 217с.

*Харьковский национальный университет
городского хозяйства имени А.Н. Бекетова*

*Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта*

Поступила в редколлегию 15.10.2013