

ТАКТИЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ НА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНОЛОГИИ

А.Новожилов, к.х.н., alik-nov@yandex.ru
В.Ракитин, к.т.н., rakitin@niifp.ru
А.Сафонов, к.т.н., asaf@niifp.ru

Тактильные датчики – это устройства, предназначенные для обнаружения контакта между предметом и поверхностью, на которой расположен датчик, и (или) определения формы этого предмета. Современное автоматизированное производство, робототехника, транспорт, строительство, медицина и медицинская промышленность используют многоэлементные датчики для определения характеристик поверхностей, создающих давление. С помощью тактильных датчиков получают информацию о величине давления и форме поверхности, которая давление оказывает. Датчики измеряют как абсолютное значение давления, так и его временное изменение, многоэлементные датчики измеряют пространственное распределение давления. Разнообразные по размеру, чувствительности, разрешающей способности датчики строятся на основе тактильных чувствительных элементов – Т-сенсоров.

Область применения тактильных датчиков очень широка. Существуют системы, требующие чувствительных матриц (подобных матрицам фотоприемников) с высокой плотностью тактильных элементов. Они предназначены для определения положения, ориентации, формы объекта со сложной поверхностью или для идентификации поверхностных дефектов. Такие датчики используют в точном машиностроении – для контроля формы деталей – и в медицине – в стоматологии, ортопедии, хирургии.

Другой класс датчиков не предназначен для распознавания объекта, а служит для получения только локальной тактильной информации, – например, о величине давления в точке касания, об ориентации поверхности объекта, ее границах (форме) и имеющихся на ней неровностях (выступах). Подобные системы требуются для многих промышленных и бытовых роботов.

Для большинства перечисленных задач нужны датчики с площадью, превышающей несколько квадратных сантиметров, поэтому для их создания в основном используются пленочные технологии на основе полимерных материалов. Применение твердотельных элементов возможно только в сочетании с полимерными, поскольку твердотельные тактильные сенсоры, такие, например, как микросхемы для снятия отпечатков пальцев, имеют маленькую активную площадь.

Базовый элемент тактильного датчика – сенсор с тактильной чувствительностью, или таксел (тактильный пиксел). Он преобразует механическое давление в электрический сигнал. На базе такселей создается тактильная поверхность – Т-сенсор. Соединенный со схемами обработки сигнала, Т-сенсор образует тактильный датчик.

Т-сенсоры характеризуются чувствительностью, разрешением, быстродействием, циклируемостью. Высокочувствительные Т-сенсоры

с высоким разрешением относят к сенсорам осязания. Обычно они строятся на основе многоэлементных матриц на гибкой органической подложке. Анализ показывает, что Т-сенсоры должны иметь следующие характеристики [1–3]:

Количество такселей в Т-сенсоре	25–10 ⁵
Пространственное разрешение.....	0,1–10 мм
Диапазон чувствительности.....	200 Па – 20 МПа
Полоса пропускания.....	1000 Гц
Нелинейность	до 7%
Гистерезис.....	3–10%

В большинстве случаев контактирующая поверхность датчика должна обладать способностью принимать различную форму (например, форму руки робота), это свойство есть у гибких Т-сенсоров, которые выдерживают многократные изгибы.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ Т-СЕНСОРОВ

В зависимости от физических принципов работы различают деформационные, пьезорезистивные, пьезоэлектрические, на основе проводящей резины, емкостные и тензорезистивные Т-сенсоры.

Наиболее распространенными являются следующие:

- резистивный,
- тензорезистивный,
- емкостной,
- пьезоэлектрический.

Резистивные сенсоры обычно образованы двумя проводящими поверхностями, разделенными тензочувствительной прослойкой. Под действием внешней силы в прослойке изменяется проводимость и величина электрического тока, и, как следствие, появляется напряжение на границах поверхностей. В простейшем случае на каждой поверхности расположено по два контакта. Измеряя возникшую разность потенциалов, определяют место приложения усилия. Этот тип сенсоров широко используется в различных терминалах.

Тензорезистивные сенсоры изготавливаются из материалов, сопротивление которых изменяется под действием силы/давления. Тензорезистивные сенсоры широко применяются в серийно выпускаемой аппаратуре, особенно они востребованы в робототехнике.

Емкостные сенсоры – это конденсаторы, расстояние между обкладками которых изменяется под действием внешней силы. Они достаточно технологичны, но очень требовательны к обслуживающей электронике.

Пьезоэлектрические сенсоры (на основе пьезоэлектриков) генерируют заряды/напряжения, пропорциональные внешней силе/давлению.

Одновременно они могут служить и актюаторами, т.е. создавать усилие под действием электрических сигналов. Наибольшие преимущества имеют пьезоэлектрические полимеры в силу простоты их сопряжения с гибкими подложками.

ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ Т-СЕНСОРОВ

Наиболее распространенные технологии создания Т-сенсоров – кремниевая КМОП, МЭМС, технологии гибких печатных плат, проводящих полимеров и органических полевых транзисторов (ОПТ).

Начинают использоваться и более новые технологии (например, микрофлюидная) и материалы (полупроводниковые нанопроволоки (NW), фуллерены, графен).

В чистом виде КМОП- и МЭМС-технологии не применяются, так как не позволяют создавать дешевые приборы на большой площади и не обладают необходимой для Т-сенсоров гибкостью, однако в гибридном варианте – КМОП ИС или МЭМС на гибкой подложке – используются очень часто. Более того, в случае необходимости сложной обработки сигналов без КМОП-элементов вообще нельзя обойтись. Тем не менее, пока субмикронная КМОП-технология слишком дорога, если, конечно, речь не идет о создании Т-сенсоров

с рекордными характеристиками, например, чувствительности.

Оптимальными по критерию цена/качество являются применяемые в Т-сенсорах полимерные (органические) материалы. Технология полимеров может быть классифицирована по методам нанесения, создания рисунка и топографии и т.п. В идеале предполагается максимальное использование дешевой печатной (рулонной) технологии [4, 5].

КОНСТРУКЦИИ МАТРИЧНЫХ Т-СЕНСОРОВ

Конструктивно матричные Т-сенсоры можно разделить на следующие типы:

- матрица из линейных такселей,
- матрица из такселей со схемами выборки и адресации.

В Т-сенсорах основными компонентами являются элементы, воспринимающие внешнее воздействие, и элементы управления ими. Требование гибкости Т-сенсоров предполагает использование гибкой подложки, на которой они располагаются. Естественным является встраивание этих элементов в саму подложку. Поскольку в качестве гибких подложек повсеместно применяют полимерные пленки, целесообразно использовать и полимерные активные элементы.

Матрица из линейных такселей. Общепринятая архитектура линейной матрицы такселей представляет собой пересечение двух взаимно перпендикулярных проводящих шин, чувствительный элемент находится в месте их пересечения. Главный ее недостаток – взаимное влияние элементов при использовании классической схемы опроса "адрес-данные".

Матрицы линейных такселей конструктивно наиболее просты. В качестве активного элемента в них используются пьезоэлектрические или тензорезистивные материалы, располагающиеся между шинами матрицы, причем расположение может быть как многослойным, так и латеральным [6].

Пример горизонтального (чисто полимерного) такселя, используемого авторами при разработке тактильных датчиков, представлен на рис.1. На полиимидную пленку наносится проводящая поверхность, служащая "замыкателем" между электродами при приложении давления.

Таксел состоит из следующих элементов (слоев): полиимидная подложка, проводящий слой – замыкатель, электроды и тензорезистивная пленка.

При формировании пьезополимера печатным способом (нанесением растворенных материалов через форсунку) исходной подложкой также служит полиимид, на который наносятся последовательно металл, пьезополимер, металл и облобочка из полиимида. В результате получается вертикальная конструкция такселя (рис.2). Такая конструкция обеспечивает более высокую чувствительность, обладает пороговой характеристикой и незначительным гистерезисом [7].

К вертикальной конструкции можно отнести и матрицы с чувствительным элементом в виде емкости. В этом случае чувствительный элемент имеет более сложную конструкцию (рис.3) [8]. Конденсатор (400×400 мкм) емкостью 171 фФ образован медными электродами с зазором, наполовину заполненным воздухом и полимером в роли

Таблица 1. Характеристики различных тактильных сенсоров

Тип	Достоинства	Недостатки
Резистивный	Чувствительность Гибкость подложки Низкая стоимость	Большая потребляемая мощность Невысокая линейность Гистерезис Определение одной точки касания
Тензорезистивный	Высокая чувствительность Низкие шумы Простота электроники Низкая стоимость	Нелинейность Гистерезис Зависимость от температуры Временная нестабильность
Емкостной	Высокая чувствительность Совместимость с КМОП	Перекрестные наводки Сложность электроники Маленькая площадь
Пьезоэлектрический	Динамический отклик Широкополосность	Зависимость от температуры Сложность электроники

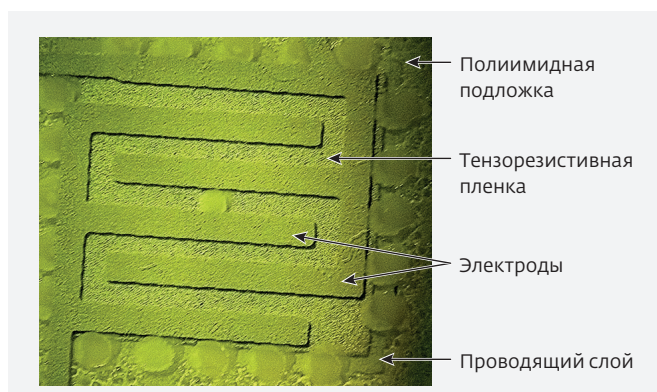


Рис.1. Конструкция латерального таксела

прокладки (см. рис.3), т.е. заключен между гибкими слоями полидиметилсилоксана (ПДМС).

Сенсорная матрица с емкостными чувствительными элементами имеет размер 22×22 мм, обладает достаточной гибкостью, обеспечивает атмосферное давление в зазорах конденсаторов. Зависимость чувствительности таксела матрицы от толщины ПДМС-слоев приведена на рис.4, насыщение кривой отклика при 40 мН соответствует давлению 250 кПа.

Считывание информации с матрицы производится так же, как и у широко используемых схем с переключаемыми конденсаторами (рис.5). В частности, применяется двойная выборка для устранения низкочастотных шумов и дрейфа. Частота обращения к матрице составляла 20 кадров/с, но может быть повышена до 1000 кадров/с. Модули матрицы допускают сборку в большие блоки (рис.6).

Матрица из такселов со схемами выборки и адресации. В этом случае удастся оптимально сочетать возможность работы таксела в линейном режиме (его наивысшую чувствительность) с наличием ключа, максимально уменьшающего перекрестные помехи.

Неизбежный разброс характеристик таксела может быть скомпенсирован при обработке

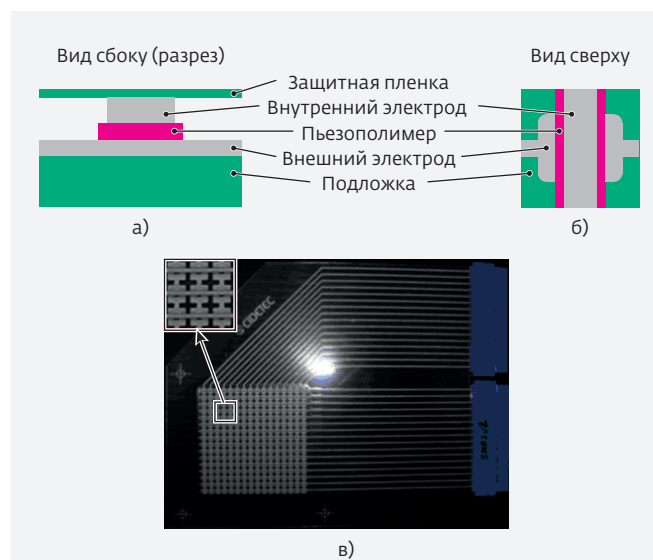


Рис.2. Разрез вертикального таксела (а), его топология (б) и фотография Т-сенсора (в)

сигналов в контроллере. Для этого в режиме настройки производится калибровка таксела, и необходимые поправочные коэффициенты сохраняются в памяти. Расширение возможностей подобных Т-сенсоров, например достижение максимальной эффективности, приводит к более сложной конструкции таксела: появляется транзистор выборки и дополнительная шина.

Т-сенсоры можно изготавливать в виде полупроводниковых приборов, встроенных в органическую электронику, или они могут представлять собой полностью органические схемы на основе органических полупроводниковых транзисторов (ОПТ). Последний подход требует решения основной проблемы – разработки дешевой технологии органических полупроводниковых материалов с высокой подвижностью носителей и создание ОПТ на основе этих материалов.

ОПТ, изготавливаемые печатным способом, позволяют снизить стоимость единицы площади

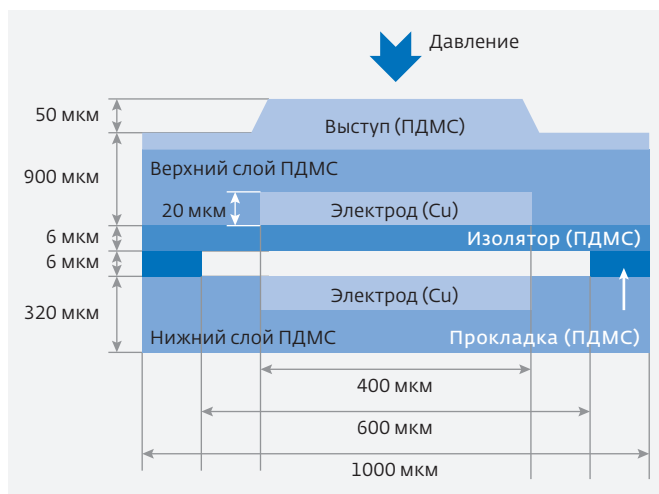


Рис.3. Структура емкостного таксела

ИС на два-три порядка по сравнению с кремниевыми ИС. Они максимально подходят для изделий гибкой электроники.

Структура ОПТ (рис.7) включает подложку, активный слой, электроды стока, истока и затвора, подзатворный диэлектрик, пассивные изолирующие слои [9, 10]. Все элементы могут быть выполнены из органических материалов, но чаще всего электроды изготавливают из тонких слоев металлов, которые обладают достаточной гибкостью. Главная конструктивная особенность ОПТ – гибкость. Главная технологическая особенность – растворимость материалов: она должна быть такой, чтобы можно было обеспечить процесс печати на

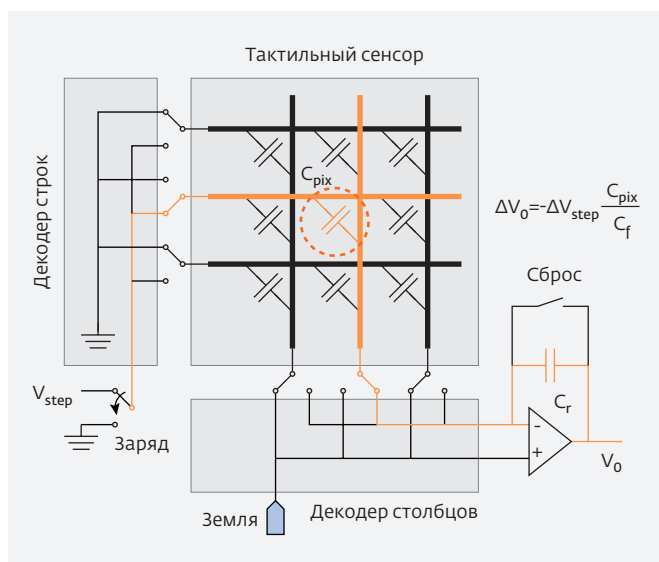


Рис.5. Архитектура и алгоритм считывания с емкостной Т-матрицы

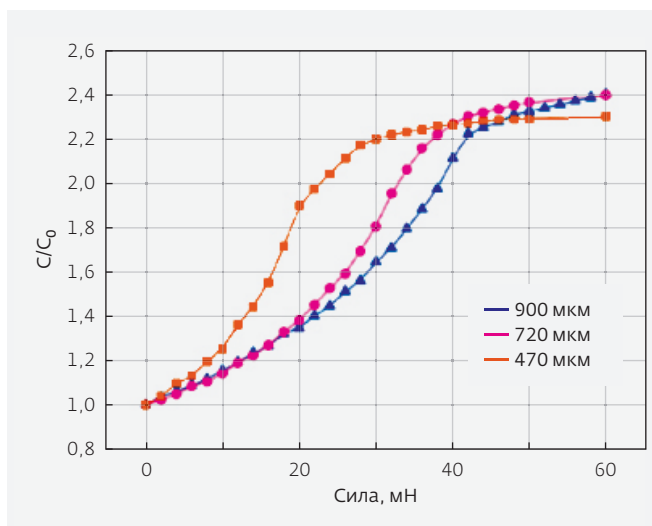


Рис.4. Характеристика отклика таксела матрицы при разных толщинах ПДМС-слоев

подложках достаточно больших геометрических размеров. Электрические особенности: высокие рабочие напряжения и пороговое напряжение, малые токи, низкое быстродействие, трудность реализации КМОП ИС, низкая стабильность. Многие электрические параметры пока намного хуже, чем у традиционных КМОП-транзисторов. Сравнение кремниевых и органических транзисторов приведено в табл.2.

Несмотря на невысокие электрические характеристики, ОПТ уже применяются во многих устройствах и системах (дисплеи, электронная бумага, солнечные батареи, биосовместимая электроника и т.п.). Совершенствуется технология ОПТ, улучшаются их характеристики. Например, подвижность носителей в ОПТ сейчас уже выше, чем у поликристаллического кремния, и ожидается, что она увеличится еще на порядок [11, 12].

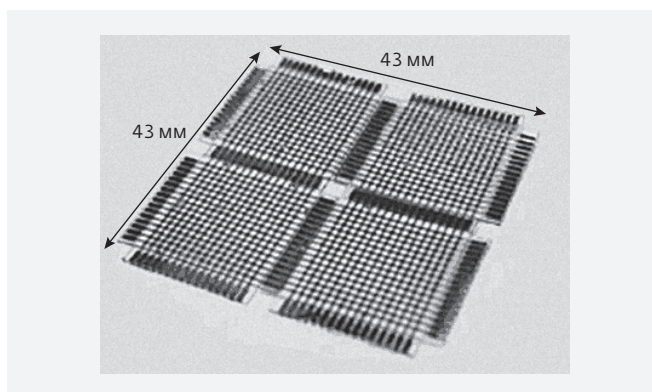


Рис.6. Сборка Т-матрицы на гибкой основе

Возможный вариант конструкции и технологии изготовления сенсоров с электроникой на ОМДП (органический материал-металл-диэлектрик-полупроводник) приведен в [13]. Транзисторы выборки, дешифраторы строк и селектор столбцов изготовлены с использованием в качестве активной области пентацена.

Изображение Т-сенсора со схемами дешифрации представлено на рис.8. При размере таксела 2,5×2,5 мм размер Т-сенсора составляет 4×4 см. Степень интеграции может быть повышена до 512×512 элементов. Допустимый радиус изгиба подложки сенсора – 5 мм. Время выборки таксела составляет 23 мс. Стоимость в 100 раз меньше, чем у кремниевой схемы аналогичной площади.

В ряде исследовательских лабораторий, в том числе в Беркли, ведутся работы по получению тактильных датчиков с уникальными характеристиками чувствительности и эргономичности с использованием гибкой электроники на основе органических материалов [14, 15]. Одно из направлений в этих работах – сочетание полимерных пленок с перспективными полупроводниковыми наноприборами, в том числе с нанопроволочными транзисторами на различных материалах [16, 17]. Например, впервые на основе монокристаллических неорганических нанополупроводников изготовлена синтетическая кожа [18].

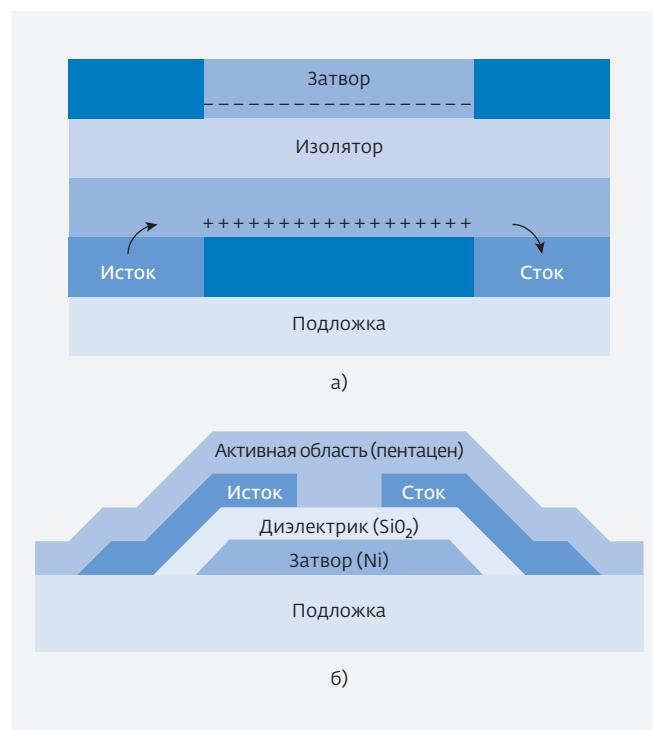


Рис.7. Физическая структура ОПТ на основе пентацена; распределение заряда в активной области ОПТ (а) и разрез структуры ОПТ (б)

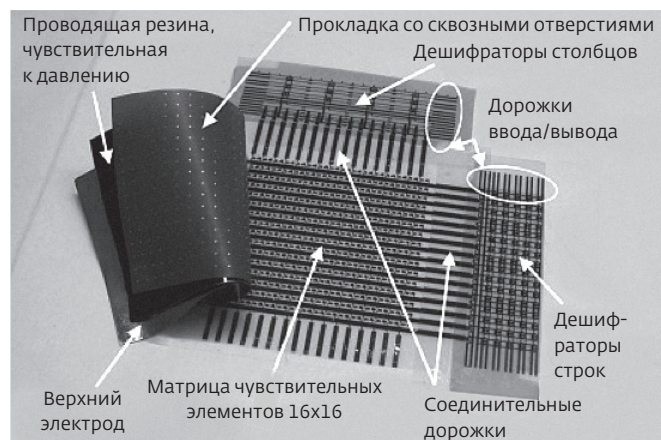


Рис.8. Т-сенсор на ОПТ со схемами дешифрации

Одним из лидеров в развитии Т-сенсоров можно считать Стэнфордский университет, где на протяжении многих лет разрабатывают физико-технологические основы органической микро- и нанoeлектроники. Здесь на основе ОПТ разработали лабораторную технологию изготовления гибких матричных Т-сенсоров [19]. Каждый таксел матрицы содержит тонкопленочный тензочувствительный конденсатор, обкладка которого одновременно является затвором ОПТ. Ключевой особенностью элемента матрицы

является наличие пирамидальных микроструктур в биосовместимом эластомере ПДМС. Подобные конденсаторы обладают рекордной тактильной чувствительностью – 3 Па (вес насекомого).

ОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТАКТИЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Несмотря на значительные успехи исследовательских лабораторий, для промышленного изготовления используются в основном простые конструкции на основе матриц с чувствительными элементами из органических материалов как обеспечивающие большую эффективность по критерию цена/качество.

Пьезоорганические полимеры. Все полимеры обладают широким спектром свойств, позволяющим преобразовать силовое воздействие в электрический сигнал. Прямая генерация электрического отклика под давлением (пьезоэлектрический эффект) – очевидный путь создания Т-сенсоров.

У пьезоэлектрических полимеров пьезоотклик слабее, чем у неорганических пьезоэлектриков, но их электрический отклик на силовое воздействие намного выше. Более того, полимеры проще в изготовлении, им легко придать нужную форму, они гибки, имеют низкие модули упругости [20].

Таблица 2. Сравнение КМОП-транзисторов и ОПТ

Свойства	КМОП	ОПТ
Режим работы канала	Сильная инверсия	Обогащение
Транспортный механизм	Перенос носителей по зоне	Имеются разные модели
Контакты стока/истока	p–n-переходы для основных носителей, один из них обратно смещен	Низкоомные контакты для основных носителей
Подложка	Определяет область канала, полупроводящая	Не имеет электрической функции, изолирующая
Типичная подвижность зарядов	400–500 см ² /В·с	<0,10 см ² /В·с в случае аморфного полупроводника
Метод переноса изображения	Литографические процессы в чистой комнате	Различные, от литографии до печати
Полупроводник	Кремний	Различные сопряженные полимеры/олигомеры
Изолятор	В основном двуокись кремния	Многочисленные варианты
Электроды/межсоединения	Металлы/поликремниевый затвор	Металлы и органические проводники
Типичный топологический размер (длина канала)	<1 мкм (вплоть до 20 нм)	>1 мкм

Наиболее изучены поливинилиденфлуорид (PVDF, ПВДФ) и его сополимеры [21–23]. Они отличаются химической стабильностью, стойкостью к растворителям, высоким модулем упругости по сравнению с другими полимерами. Чувствительность полимера к давлению составляет 100 мВ/Н, динамический диапазон Т-сенсора на его основе достигает 10^4 [31].

Тензорезистивные полимеры. Особый интерес представляют полимерные полупроводники, проводимость которых зависит от внешних условий – в данном случае от давления [24]. В качестве тензорезистивных полимеров часто используют тензорезистивные композиты (проводящую резину). Простейший тензорезистивный композит состоит из мелких проводящих частиц, распределенных в диэлектрической полимерной матрице. Проводящим материалом служит сажа, мелкие металлические частицы и др.

При отсутствии давления композит является изолятором. При сжатии материала возникает проводимость за счет ряда эффектов (образование проводящих цепочек, туннельный эффект между цепочками и отдельными структурами).

В металлонаполненных композитах проводящим частицам можно придать устойчивую

шиповидную форму (например, карбонилу никеля). В этом случае возможно туннелирование под действием поля (эффект Фаулера-Нордгейма) из острых шипов на поверхности частиц. Этот класс композитов называют композитами с квантовым туннелированием, в отличие от обычных, в которых для высокой проводимости необходимы контакты между частицами. Удельное сопротивление композитов при сжатии может снижаться на несколько порядков. Аналогичный эффект наблюдался, например, в полидиметилсилоксане (ПДМС) с частицами цинка [25].

Получают подобные полимеры синтезом несопряженных полимеров, в которых высокая проводимость обусловлена взаимодействием с металлическими электродами. Такие полимеры получили название электроактивных [26].

В области органических полупроводников накоплен большой объем данных. Установлено, что ряд широко распространенных в микроэлектронике полимеров (полиэтилен, полистирол, полиимид, ПММА, ПДМС и др.) можно сделать проводящими без допирования. Особый интерес представляет изучение влияния давления на электропроводность относительно тонких пленок электроактивных полимеров. У некоторых наблюдается ряд интересных тензорезистивных особенностей:

- аномально низкие величины внешнего давления, индуцирующие переход в высокопроводящее состояние;
- пороговый характер явления, переход в высокопроводящее состояние осуществляется при достижении внешним полем определенной критической величины;
- изменение электропроводности полимерной пленки часто происходит скачком, при этом проводимость возрастает на несколько порядков;
- в высокопроводящем состоянии проводимость полимера изменяется с температурой (вплоть до сверхнизких), так же как в металлах.

Далее приводится обзор полимерных материалов, которые в наибольшей степени подходят (с точки зрения технологии) для изготовления датчиков с тактильной чувствительностью [27].

Полифениленвинилен (1,2-метокси-5-(2'-этилгексилосон)-1,4-фениленвинилен (ПФВ). Полимер представляет собой порошок красно-коричневого цвета. Средневесовая молекулярная масса $M_B = 77-180$ тыс. а.е.м. В органических растворителях растворяется незначительно, причем растворимость уменьшается с увеличением молекулярной массы. В хлорированных углеводородах (хлороформ, тетрахлорэтан, хлорбензол), тетрагидрофуране, о-ксилоле можно приготовить растворы ПФВ с концентрацией до 0,8-1%. Пленки толщиной от 0,05 до 0,16 мкм на подложках из различных материалов были получены из растворов методом центрифугирования. В качестве растворителя применялся хлорбензол.

Полидифениленфталид (ПДФФ). Пьезорезистивные свойства тонких пленок ПДФФ были замечены около двадцати лет назад [26]. (На основе ПДФФ в НИИФП им.Лукина были разработаны различные типы сверхтонких переключающих устройств (толщина около 1 мкм) для управления электробытовыми приборами, а клавиатуры домофонов и сегодня изготавливаются на экспериментально-производственном участке предприятия.) Эластичные пленки полидифениленфталиды толщиной 0,15-0,4 мкм были получены центрифугированием из раствора 5-6%-й концентрации. Пленки отличаются высокой прочностью и термостойкостью (до 320°C).

Замещенные производные бензойной кислоты. Исследования показали, что не только полимерные пленки на основе композиций ортобензоилбензойной кислоты (О-ББК) и акрилового полимера имеют пьезорезистивные свойства, но и другие замещенные кислоты – ортотолуилбензойная (О-ТБК) и ортоксилоилбензойная (О-КБК) – обладают

аналогичными свойствами при введении их в полимерную матрицу. Все три соединения хорошо совместимы с полимерами акрилового ряда в растворах с концентрацией до 30% и соотношением полимер/замещенная кислота, равным 1/1. Из растворов методом центрифугирования на подложках формируются однородные пленки толщиной 0,1-2 мкм.

Полианилин (ПА) уже 100 лет назад был известен как анилиновый краситель в текстильном производстве, и лишь около 20 лет назад начались интенсивные исследования проводимости полианилиновых солей [28-30]. Авторы синтезировали полианилин из анилина в кислых водных растворах в присутствии персульфата аммония (катализатор полимеризации). В качестве кислоты в реакционную среду вводилась соляная кислота или паратолуолсульфокислота. В зависимости от метода выделения полимера из реакционной массы ПА может быть получен в виде ПА-основания или ПА-соли соответствующей кислоты. ПА-основание нерастворимо в органических растворителях и является хорошим диэлектриком, представляет собой фиолетово-черный порошок, растворимый в сильных кислотах (концентрированная серная кислота). ПА-соль – порошок темно-зеленого цвета, частично растворим в ограниченном числе растворителей: диметилформамиде, тетрагидрофуране, диоксане, гораздо лучше растворим в органических кислотах (муравьиной, уксусной). Проводимость ПА-солей можно регулировать степенью допирования кислотой. При максимально возможном допировании проводимость приближается к проводимости металлов.

Пленки для тактильных датчиков толщиной 0,1-0,5 мкм были получены из 1-2%-х растворов ПА в муравьиной кислоте методом центрифугирования. Проводимость ПА-солей увеличивается с увеличением влажности, поэтому датчики должны быть защищены от воздействия влаги.

Акриловые полимеры. Полимеры акрилового ряда представляют интерес с точки зрения их использования в качестве матрицы для наполнения низкомолекулярными веществами, которые обладают пьезорезистивными свойствами. Акриловые мономеры позволяют с помощью сополимеризации получать сополимеры с широким спектром температур стеклования – от жестких материалов с температурой стеклования 105°C (полиметилметакрилат) до материалов с температурой стеклования 50°C (сополимер метилакрилата). Путем несложных расчетов можно синтезировать сополимер с любой заданной температурой

стеклования, т. е. с любой степенью эластичности. Так, для разработки пьезорезистивных составов на основе замещенных бензойных кислот был синтезирован сополимер метилметакрилата с 2-этилгексилакрилатом (96:4) с температурой стеклования 82°C.

Для крепления тонких подложек из лавсана к жестким носителям (при нанесении слоев на центрифуге и напылении металлов) был разработан специальный акриловый состав АКС-50 (температура стеклования 45°C, соотношение метилметакрилата, бутилакрилата и акриловой кислоты равно 15:80:5). Клеевой слой, сформированный на поверхности лавсановой ленты, обеспечивает сопротивление сдвигу 170 г/см².

Сополимеры синтезировались методом радикальной полимеризации в растворе. В качестве растворителей использовались этилцеллозольв, циклогексанон, бутилацетат и диглим. Заданная величина молекулярной массы сополимеров (120–180 тыс. а.е.м.) достигалась заменой инициатора полимеризации (перекись бензоила или

азоизобутилонитрил), подбором концентрации инициатора (0,25–0,75%) и температуры полимеризации (60–96°C). Полимеризация проводилась в виде 30%-х растворов мономеров в растворителе. Необходимую концентрацию растворов для формирования полимерных пленок с заданной толщиной слоя получали разбавлением исходных 30%-х растворов.

Тактильная чувствительность синтезированных полимеров. Для исследования тактильной чувствительности полимеров изготавливались тестовые структуры. Для этого на заготовках размером 55×55 мм из лавсана или фольгированного стеклотекстолита формировались токопроводящие шины с шагом 10 мм напылением через маску алюминия толщиной 1 мкм или травлением медной фольги с применением фотолитографии. На изготовленные подложки методом центрифугирования из растворов наносились слои пьезорезистивных полимеров, описанных выше.

Для каждого из выбранных полимеров экспериментально подбиралась толщина слоя,

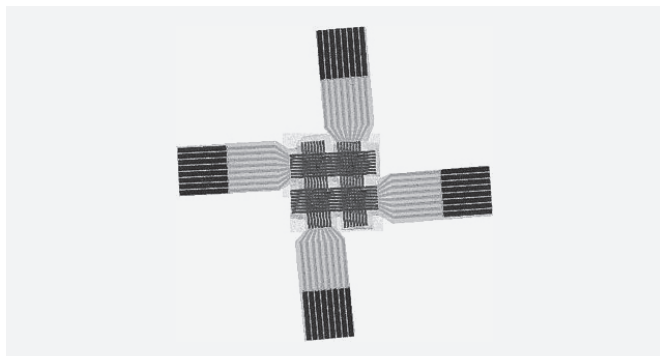


Рис.9. Тактильный сенсор (16×16 такселей), чувствительность 140 Па

обеспечивающая максимальную чувствительность к нагрузке. Поскольку с уменьшением толщины слоя на подложке могут появляться дефекты в виде проколов, неоднородностей по толщине, все пленки формировались толщиной более 0,1 мкм. Для полимеров с собственной проводимостью (ПФВ, ПА) было предусмотрено формирование второго, защитного диэлектрического слоя на поверхности. В качестве диэлектриков использовались те же акриловые полимеры, однако для них был подобран органический растворитель – этилцеллозоль, который не

растворяет полимерную пленку ПФВ и ПА, нанесенную на подложку.

Верхний электрод тестовой структуры формировался на лавсановой пленке (толщиной 12 мкм) вакуумным напылением алюминия толщиной 0,1 мкм через маску. Электрод представляет собой полосы алюминия шириной 5 мм с шагом 10 мм. Для образования контактных площадок он накладывался на подложку со сдвигом на несколько миллиметров и крепился с помощью клея АКС-50. Для контактирования с верхним электродом использовались 16-контактные разъемы для пленочных клавиатур.

Измерения проводились на специальном стенде, исследовались различные сочетания типов подложек и тензорезистивных пленок. Составы, показавшие наилучшие характеристики чувствительности, наиболее технологичные в изготовлении, а также малочувствительные к таким параметрам окружающей среды, как влажность и температура, представлены в табл.3.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наиболее перспективными с точки зрения максимальной тактильной чувствительности оказались:

- полимерные пленки на основе полифениленвинилена (ПФВ);

Таблица 3. Характеристики синтезированных полимеров

Материал	Подложка	Толщина слоя полимера, мкм	Порог срабатывания, средний, г	Давление срабатывания, Па
ПФВ	Al/лавсан	0,156	1,9	760
ПГА-Кс	Al/лавсан	0,350	4,0	1600
ПГА-Кс с наполнителем С-1 (26%)	ИТО/стекло	0,310	0,9	360
ПФВ	Сu/стеклотекстолит	0,135	0,57	230
ПФВ ПГА	Al/лавсан	0,110	8,0	3200
ПВФ ПММА	Сu/стеклотекстолит	0,110	1,35	540
ПММА-Э	Сu/стеклотекстолит	0,270	11,0	4400
ПММА-Э	Al/лавсан	0,210	2,35	940

ПФВ – полифениленвинилен; ПГА-Кс – пленка сформирована из 15%-го раствора смеси сополимера метилметакрилата и 2-этилгексилакрилата (94:4) с оксифенилбензойной кислотой. Соотношение компонентов смеси 1:1, растворитель – этилцеллозоль; С-1 – графитовый порошок с размером частиц не более 1 мкм; ПММА – полиметилметакрилат; ПММА-Э – сополимер метилметакрилата с этилгексилакрилатом 94:4; ИТО (Indium Thin Oxide – $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$) – прозрачный проводящий материал, широко используется при производстве дисплеев.

Таблица 4. Характеристики тактильных датчиков, выпускаемых зарубежными компаниями

Производитель	Диапазон давлений	Пространственное разрешение, мм	Количество элементов	Площадь сенсора	Толщина сенсора, мм
Tekscan, Inc.	До 200 МПа	От 0,6	До 10^5	До 2300×970 мм	0,1
XSENSOR Technology	2700 Па – 1,7 МПа	10	До 10^4	До 100×100 см	0,6
Sensor Products Inc.	700 Па – 1,4 МПа	12	До 64×256	До 3800×3800 см	0,3
Pressure Profile Systems, Inc.	До 14 МПа	От 1	До 10^4	До 500×400 мм	0,3

- сополимеры метилметакрилата, наполненные замещенными бензойными кислотами (составы ПГА-Б, ПГА-К, ПГА-Т);
- полианилин и сополимеры метилметакрилата с 2-этилгексакрилатом и бутилакрилатом.

Использование этих материалов позволило создать тактильные двумерные датчики, не уступающие по чувствительности лучшим образцам тактильных датчиков других типов. Как пример, на рис.9 показана фотография матричного датчика форматом 16×16 элементов. Датчик изготовлен на

лавсановой подложке с ПФВ в качестве тензорезистивного материала, имеет пространственное разрешение 2 мм и чувствительность 140 Па.

Некоторые данные о полимерных тактильных датчиках, выпускаемых зарубежными компаниями, приведены в табл.4.

В заключение надо сказать, что на базе полимерных материалов можно создавать матричные датчики с линейной характеристикой и диапазоном

нагрузок, обеспечивающим решение достаточно широкого круга задач в области определения формы предметов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dario P., De Rossi D.** Tactile sensors and gripping challenge. – IEEE Spectrum, 1985, vol.22, №8, p.46–52.
2. **Howe R.D.** Tactile sensing and control of robotics manipulation. – Journal of Advanced Robotics, 1994, vol.8 (3) p.245–261.
3. **Dahiya R.S., Valle M.** et al. Tactile sensor arrays for humanoid robot. – IEEE PRIME'07. The 3rd International Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics. Bordeaux, France, IEEE.
4. **Kahn B.** Organic electronics technology, OEA. – Organic Electronics, 2006, p.19.
5. **Mäkelä T.** Towards printed electronic devices. – ESPOO, 2008.
6. **Hsu1 C.H.** Flexible pressure sensing device using blended nano-carbon-black. – P3HT Solution Process 19th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, October 6–9, 2008, Ascona, Switzerland.
7. **Castellanos-Ramosa J.** et al. Tactile sensors based on conductive polymers. – Microsystem Technologies, 2010, vol.16, p.765–776.
8. **Lee H.-K., Chang S.-I., Yoon E.** A flexible polymer tactile sensor: fabrication and modular expandability for large area deployment. – Journal of microelectronomechanical systems, 2006, Dec., vol.15, №6, p.1681–1686.
9. **Chong-an Di** et al. High-performance organic field-effect transistors: molecular design, device fabrication, and physical properties. – J. Phys. Chem. B, 2007, vol.111, p.14083–14096.
10. **Vardeny V.** et al. Fundamental research needs in organic electronic materials. – Synthetic Metals, 2005, vol.48, p.1–3.
11. **Eshraghian K.** SoC emerging technologies. – Proc. of the IEEE, 2006, vol.94, №6, p.1196–1213.
12. **OE-A** roadmap for organic and printed electronics OEA, 2008.
13. **Kawaguchi H.** et al. Cut-and-paste customization of organic FET integrated circuit and its application to electronic artificial skin. – IEEE J. Solid-State Circuits, 2006, vol.40, №1, Jan. p.177–185.
14. **Javey A.** et al. Toward the development of printable nanowire electronics and sensors. – Adv. Mater., 2009, vol.21, p.3730–3743.
15. **Fan Z.** et al. Three-dimensional nanopillar-array photovoltaics on low-cost and flexible substrates. – Nature Materials, 2009, vol.8, №8, p.648–653.
16. **Yerushalmi R.** et al. Large scale, highly ordered assembly of nanowire parallel arrays by differential roll printing. – Applied Physics Letters, 2007, vol.91, №20.
17. **Takahashi T.** et al. Monolayer resist for patterned contact printing of aligned nanowire arrays. – J. Am. Chem. Soc., 2009, 131, p.2102–2103.
18. **Takei K.** et al. Nanowire active matrix circuitry for low-voltage macro-scale artificial skin. – Nature Materials, 2010, №9, p.821–826.
19. **Mannsfeld S.** et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with micro-structured rubber as the dielectric layer. – Nature Materials, 2010, vol.9, p.859–864.
20. **Lopez M., Sanchez H.** Characterization of piezoelectric materials as a power source for electronic implantation devices. – Microelectronics Journal, 2008, №39, p.1306–1307.
21. **Yuji J., Sonoda C.** A PVDF tactile sensor for static contact force and contact temperature. 5th IEEE Conference on Sensors, 2006, p.738–741.
22. **Dahiya R. S., Valle M.** et al. Deposition processing and characterization of P(VDF-TrFE) thin films for sensing applications. – IEEE Sensors, 2008, p.490–493.
23. **Lee H., Rodrigo C., Wang H., Liang.** Nano-scale characterization of a piezoelectric polymer (polyvinylidene difluoride, PVDF). – Sensors, 2008, vol.8 (11), p.7359–7368.
24. **Блайт Э.Р., Блур Д.** Электрические свойства полимеров. М.: Физматлит, 2008.
25. **Majid Kazemian Abyaneh, Sulabha K. Kulkarni.** Giant piezoresistive response in zinc-polydimethylsiloxane composites under uniaxial pressure. – J. of Phys. D: Appl. Phys. 2008, 41.
26. **Лачинов А.Н., Воробьева Н.В.** Электроника тонких слоев широкозонных полимеров. – УФН, 2006, т.176, №12, с.1249.
27. **Новожилов А.В.** Тензорезистивные полимеры для тактильных датчиков. – Глобальный научный потенциал, 2012, №7, с.61–65.
28. **Кобрянский В.М.** ВМС, сер.А, 1995, т.37, №1, с.35.
29. **Wang Shenglong, Wang Fosong.** Polymerization of substituted aniline and characterization of the polymers obtained. – Synthetic Metals, 1986, vol.16 (1), p.99–104.
30. **Wang S., Tanaka K., Yamabe T.** A study of the electroactivity decay of polythiophene film electrodes. – Synthetic Metals, 1989, v.32 (2), p.141–150.
31. **Mohammad Ameen Qasaimeh, Mohammadreza Ramezanifard, Javad Dargahi.** An endoscopic grasper with corrugated plate-shaped tactile sensors. – Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2009, vol.4, №5, p.913–926.