

Инновационные токопроводящие плёнки с элементами TFT как способ зарядки от теплового и вибрационного датчика QOT для носимых электронных устройств

Андрей Ласорла

Учёные многих стран мира работают над преобразованием энергии тепла в электрический ток с конца XIX века, когда контроль над электрическим током ощущался таким же прогрессом, как сегодня Интернет, цифровизация и ИИ. Гибкая РЭА применяется в различных областях, таких как панельные дисплеи, электронные датчики, шлейфы и устройства накопления данных, что стимулирует значительный интерес к новым материалам и технологиям их обработки. Сегодня за неполных два века можно говорить о том, что разработчикам удалось создать ультратонкую гибкую плёнку для подзарядки электронных устройств небольшой мощности на основе TFT, в частности, для подзарядки аккумуляторов смартфонов непосредственно от тепла тела человека. Такие электронные датчики пока размещают на кожном покрове, а в ближайшем будущем будут встраивать в умную одежду человека. В статье рассматриваются инновации в тонкоплёночных транзисторах (TFT), которые являются важнейшими компонентами, позволяющими создавать электронные схемы на гибких подложках, а разработка элементов TFT с высокой производительностью и с механической гибкостью для РЭА – предмет перспективных исследований.

Гибкие термоэлектрические устройства можно удобно носить на коже как почти незаметные и эффективные преобразователи в электричество – на основе разницы температур между человеческим телом и окружающим воздухом. Их также можно применять в ограниченном пространстве. Другие потенциальные области применения возможны от персонального терморегулирования, где тепло тела может питать носимую систему коррективы личного климата, вентиляции и кондиционирования воздуха. А это даёт значительный шаг вперёд в повышении качества и устойчивости жизнедеятельности человека в разных условиях, включая критические. К примеру, любители охоты, рыбной ловли, шахтёры, полярники, геологи или жители северных регионов в условиях сбоев отопления в холодное время года ранее применяли такие личные средства защиты от обморожения, как тёплая одежда, термобельё, термоноски, каталитические грелки на основе химической реакции и специальные плоские автономные источники тепла (рис. 1).

К неоспоримым преимуществам новейшей разработки относят высокие термоэлектрические характеристики, гибкость и масштабируемость в сочетании с низкой стоимостью, что делает генератор электроэнергии на основе плёнки одним из лучших гибких термоэлектриков среди доступных к изучению и совершенствованию. В последнее время легко сгибаемые или тонкие электронные устройства стали частью нашей повседневной жизни. Электронные устройства, такие как умные часы, сгибаемые экраны и носимые датчики, предлагают повышенное удобство и универсальность и, как ожидается, будут применяться в различных областях в будущем. Для разработки этих продуктов необходимы гибкие, но прочные электронные компоненты. В недавно презентованном технологическом процессе используют крошечные наносвязующие кристаллы, образующие сплошной слой листов теллурида висмута с итоговым повышением как проводимости электрического тока, так и гибкости материала. Открытые ранее термоэлектрики на основе теллурида висмута имели высо-

кие показатели эффективности в преобразовании тепла в электричество, что давало перспективу для маломощных приложений, таких как мониторы сердечного ритма, температуры или движения. Теперь использован сольвотермальный синтез с формированием нанокристаллов в растворителе при высокой температуре и давлении в сочетании с трафаретной печатью и спеканием. Метод трафаретной печати позволяет производить плёнки в больших масштабах, в то время как спекание нагревает плёнки почти до точки плавления, связывая их элементарные частицы надёжно и без потери упругости и гибкости готовой конструкции.

В изобретении и продвижении инновации отличилась совмещённая исследовательская группа из Квинслендского технологического университета – Мэтью Даргуш и профессор Цзинь Цзоу (Австралия), Университета Суррея (Великобритания) – профессор Гао Цин и исследовательская группа QUT DGIST (Институт науки и технологий Тэгу Кёнбук) – доктор Чан Бонг-хо и профессор Квон (рис. 2), а также их коллеги, специалисты исследовательского центра ARC по производству электроэнергии с нулевым уровнем выбросов для достижения углеродной нейтральности Школы химии и физики QUT и Центра материаловедения. Об этом стало известно в декабре 2024 года [1, 2, 7].



Рис. 1. Специальные плоские автономные источники тепла на основе химической реакции с воздухом

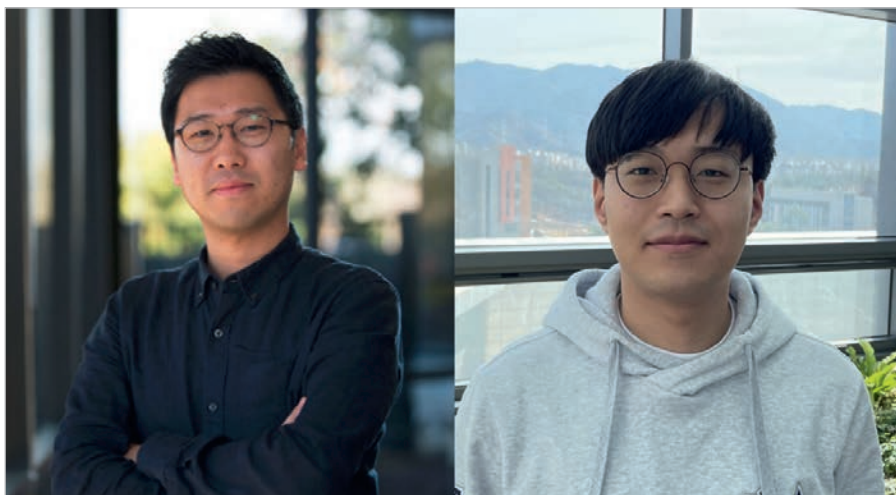


Рис. 2. Доктор Чан Бонг-Хо (слева) и профессор Квон из Института науки и технологий Тэгу Кёнбук

Группа исследователей разработала экономичную в реализации сверхтонкую и гибкую по форме технологию с помощью наноплёнок для питания носимых электронных устройств нового поколения, используя тепло тела человека и устраняя необходимость в привычных аккумуляторах. Материал синтезируют, затем печатают по трафарету и спекают в плёнку в нужном формате. Ранее созданные образцы были недостаточно гибкими, а их производство было дорогим.

Особенности и польза

В гибких формах размещены тонкоплёночные полупроводники, способные сохранять высокую производительность при низких температурах – до -50°C . Они могут работать на пластиковых подложках, в том числе складываемых, сворачиваемых, и при этом сохранять стабильную производительность при многократном механическом изгибе. За такими разработками будущее интеллектуальных устройств современной электроники. Тонкоплёночные транзисторы сделаны чрезвычайно тонкими и точными.

Многофазные процессы производства покрытия в жидком состоянии подходят для недорогого массового производства. Типичные материалы, созданные с применением «жидкофазной технологии», имеют большие преимущества с точки зрения высокой связанности с технологией печати. Однако есть ограничения: высокие температуры, необходимые для формирования превосходных тонких плёнок; их затруднительно применять на гибких подложках с низким термическим сопротивлением.

Ранее выбор материалов покрытия был ограничен высокими температурами, необходимыми для производства высококачественных тонких плёнок, что затрудняло его нанесение на гибкие подложки, такие как термочувствительные пластики. Поэтому исследователи сосредоточились на разработке новых методов синтеза производства для снижения температуры, но с сохранением высокой производительности. Для производства высокопроизводительных оксидных плёнок без повышения внешней температуры используется тепло, выделяемое внутри материала во время жидкостного процесса, – до $+250^{\circ}\text{C}$. Также новая высокопроизводительная пластиковая пена, разработанная на основе сыровоточных белков, может выдерживать экстремальные температуры лучше, чем многие распространённые термопластики, изготовленные из нефти.

Так был разработан новый тип тонкоплёночного транзистора на пластиковой подложке. По результатам испытаний такой элемент продемонстрировал стабильную работу в тестах на изгиб в условиях более 5000 циклов. Поэтому датчик на основе тонкоплёночного полупроводника признан годным и перспективным для широкого применения в РЭА и носимых устройствах следующего поколения.

Инновационные плёнки для высокопроизводительных TFT

Гибкие оксидные тонкоплёночные транзисторы (TFT) с использованием полупроводника SnO_2 и диэлектрика High-k ZrO по старой технологии сформированы с помощью золь-гель-

процессов и воздействия горения. Способ предполагал экзотермическую реакцию топлива и окислителей для получения высококачественных оксидных плёнок без обширного внешнего нагрева. Плёнки, полученные с помощью горения, имели структуру с высокой долей кислорода, что способствовало низкому току утечки и не зависящим от частоты диэлектрическим свойствам. TFT, изготовленные на гибких подложках с использованием синтеза горения, имели неплохие электрические характеристики, включая полевую подвижность, подпороговый размах и соотношение между током включения и током выключения ($1,13 \times 10^6$) при низком рабочем напряжении 3 В.

Предтечи новой разработки

Среди нескольких полупроводниковых кандидатов для гибких TFT полимеры имеют ограничения из-за низкой подвижности и относительно плохой устойчивости к окружающей среде, вызванной свойствами воды и кислорода, несмотря на их низкую температуру обработки и стабильную механическую гибкость. Напротив, оксиды металлов считаются перспективными материалами для каналов TFT из-за высокой подвижности носителей (даже в аморфной фазе) и превосходной оптической прозрачности, приписываемой их уникальной орбитальной структуре и широким запрещённым зонам. Поэтому они были признаны привлекательными материалами для разработки приложений следующего поколения, таких как дисплеи с высоким разрешением и высокой частотой кадров, а также высокопроизводительная прозрачная и гибкая электроника. В частности, интерес к гибким оксидным TFT заметно возрос с разработкой гибких TFT с использованием a-IGZO, что привело к значительным успехам в индустрии дисплеев с активной матрицей.

В последние несколько лет исследования новых оксидов металлов, не включающих редкие элементы In и Ga в a-IGZO, при достижении более высокой подвижности TFT очень актуальны. Среди различных оксидов те, что на основе Sn, такие как ITZO, IGTO, ZATO и SnO_2 , продемонстрировали хорошие электрические характеристики с высокой устойчивостью к условиям эксплуатации. С точки зрения обработки оксидные TFT совместимы с различными способами про-

изводства и изготовления, такими как центрифугирование, пиролиз распылением и системы печати, которые могут быть расширены за пределы традиционных вакуумных методов вплоть до растворения с использованием жидких золь-гель-прекурсоров. Это и обеспечивает преимущество в экономическом эффективном производстве на больших площадях по сравнению с вакуумными системами, такими как распыление и атомно-слоевое осаждение.

Поскольку в производстве TFT используются жидкие прекурсоры, можно гибко манипулировать составом золь-гель-раствора для получения желаемых характеристик оксидных плёнок. Эти инновационные методы также распространяются на оксидные электроды. В случаях, когда требуются тройные соединения или легирование, к примеру, для оксидных электродов, можно комбинировать разные прекурсоры для синтеза раствора и изготавливать полностью обработанные раствором оксидные TFT. Несмотря на потенциал процессов в растворе, разложение органических лигандов в оксидных плёнках, обработанных золь-гель-методом, и плотная структура сетей оксидов металлов предполагают высокотемпературный процесс отжига при температуре 400°C или выше, что, как правило, несовместимо с производством гибких подложек [10].

Поэтому разработчики применяют разные способы, включая УФ- или лазерный отжиг, отжиг O_2 и воздействие водными растворителями для формирования оксидных плёнок, обработанных в растворе при низких температурах, что гарантирует качество плёнки и соответствует термическим требованиям к гибким подложкам.

Новая технология позволяет производить высококачественные оксидные плёнки при низких температурах без необходимости использования дополнительных систем. Кроме того, обеспечивает гибкость для изменения состава раствора или его интеграции с другими низкотемпературными методами изготовления для получения дополнительных эффектов. Материалы и ранее широко использовались в качестве диэлектрика затвора в оксидных TFT. При низких напряжениях возбуждения TFT элементы из-за низкой диэлектрической проницаемости – истончение диэлектрика затвора при уменьшении масштаба электронных устройств – характеризуются относи-

тельно высоким током утечки затвора. Это затрудняло их применение в гибких устройствах следующего поколения, требующих высокой производительности и низкого энергопотребления.

В качестве новых диэлектрических слоёв были предложены диэлектрики High-k, позволяющие снизить рабочее напряжение и накопление носителей высокой плотности за счёт высоких значений ёмкости. К примеру, оксиды High-k, обработанные золь-гелем, обеспечивают работу при относительно низком напряжении и разделяют производственный процесс с оксидными полупроводниками. Теперь из-за широкой зоны отклика и аморфного состояния элементов это привело к положительно-низкому току утечки затвора. Материал на основе ZrO_2 решено использовать в качестве изолирующего слоя в оксидных TFT для работы с низким энергопотреблением из-за высокой диэлектрической проницаемости (> 20), достаточной ширины запрещённой зоны (отклика) (~5,8 эВ) и электрической/химической стабильности.

Гибкие TFT демонстрируют различия в характеристиках в зависимости от размера. Элементы с более коротким проводящим каналом дают относительно сниженное сопротивление по сравнению с устройствами с более длинными каналами из-за влияния контактного сопротивления. Хотя устройства изготовлены из тех же материалов, по мере уменьшения длины канала сопротивление канала уменьшается, и, следовательно, доля контактного сопротивления в общем сопротивлении увеличивается. В результате эффективное падение напряжения на области канала изменяется: по мере уменьшения размера канала наблюдается уменьшение SS, что указывает на улучшение качества интерфейса между полупроводником и изолятором. Меньшие TFT могут иметь меньше дефектов в области интерфейса, что приводит к уменьшению захваченных электронов в местах ловушек интерфейса. Электрические характеристики изготовленных гибких TFT можно сравнить с вакуумными или обработанными в растворе гибкими оксидными TFT с диэлектриком High-k, а их подвижность полностью совместима с современными дисплеями с активной матрицей высокого разрешения.

Из последних достижений в области тонкоплёночных транзисторов на основе оксида олова для РЭА отметим, что созданы низковольтные высокопроизводительные тонкоплёночные транзисторы из оксида индия, олова и цинка на основе двухканального анодного оксида. Улучшена производительность и эксплуатационная стабильность тонкоплёночных транзисторов InGaSnO (IGTO), обработанных раствором, путём образования комплексов Sn-O. Методом магнетронного распыления созданы тонкоплёночные транзисторы на основе аморфного Zn-Al-Sn-O (без индия). Также среди перспективных методов – изменение источника энергии, селективная подача энергии в локализованные области и снижение температуры преобразования в оксиды. Синтез горения представляет собой химический процесс, который использует внутреннюю энергию, генерируемую в результате экзотермической реакции добавленного органического топлива и окислителя в прекурсор, что позволяет устранить органические остатки и способствует переходу к оксидным плёнкам даже при пониженных внешних температурах. А в описываемой инновации гибких тонкоплёночных транзисторов InGaZnO удалось повысить термоэлектрические характеристики плёнок на основе однослойных углеродных нанотрубок за счёт рациональной тройной обработки.

Особенности синтеза основных материалов

Ранее плёнки SnO_2 успешно наносили при низких температурах с использованием синтеза горения и изготавливали TFT SnO_2 на Si/SiO₂ с улучшенными характеристиками TFT. Но термический анализ подтвердил, что внешняя температура, необходимая для преобразования прекурсора, составляла +250°C, что значительно ниже, чем у обычных прекурсоров. Поэтому новые TFT-элементы демонстрировали значительно улучшенные электрические характеристики по сравнению с обычными устройствами SnO_2 , при этом подвижность увеличилась примерно в 170 раз: с 0,014 до 2,43 см с обработкой золь-гелем в низкотемпературных процессах. Внешняя температура процесса, необходимая для формирования оксидной сетки, оценена с помощью термогравиметрического анализа (TGA). Различия в структурном и хими-

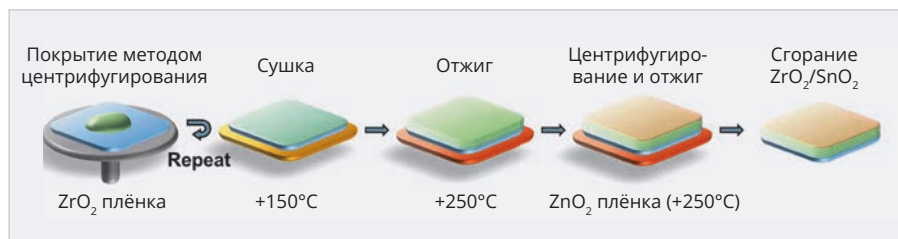


Рис. 3. Иллюстрация процесса формирования плёнок ZrO_2/SnO_2 с использованием сжигаемых растворов

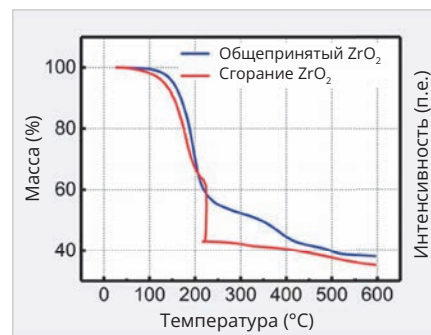


Рис. 4. Эволюция зависимости и конверсия разницы производства старых и новых типов токопроводящих плёнок

плёнок превышала 400°C). Эту условную эволюцию зависимости и конверсию разницы производства старых и новых типов токопроводящих плёнок демонстрирует рис. 4.

Диэлектрические свойства токопроводящих плёнок

Изолятор из кремния – металл-изолятор-кремний (MIS) – изготовлен для исследования влияния синтеза горения на диэлектрические свойства токопроводящих плёнок ZrO_2 . В отношении диэлектрических свойств токопроводящих плёнок имеет значение зависимость механической гибкости (деформации) не только от условий воздействия и среды, но также от частоты воздействия и частоты электрического сигнала.

На рис. 5 представлены два графика плотности тока утечки в зависимости от электрического поля как для обычных (ранее разработанных на относительно твёрдой подложке), так и для новейших токопроводящих плёнок на основе ZrO_2 . Обычные токопроводящие плёнки характеризуются полем пробоя $\sim 3,1$ МВ/см и плотностью тока утечки $\sim 2,82 \times 10^{-7}$ А/см² при 1 МВ/см. Однако новые разработки, рассматриваемые в настоящей статье, полученные путем синтеза горения, демонстрируют значительное увеличение поля пробоя до $\sim 8,3$ МВ/см, что примерно в 2,7 раза выше, и существенное снижение плотности тока утечки до $\sim 3,06 \times 10^{-9}$ А/см², что примерно составляет 1/100 от предыдущего значения, при 1 МВ/см. Проиллюстрированы (рис. 5) статистические результаты и подробные значения диэлектрических постоянных в зависимости от частоты воздействия: кривые диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты и изменение диэлектрической проницаемости в

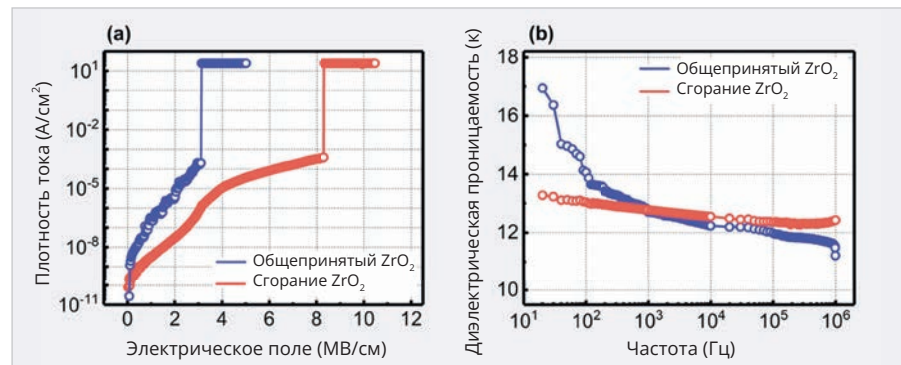


Рис. 5. Графики плотности тока утечки в зависимости от электрического поля Слева (а) показан ток утечки в зависимости от электрического поля, справа (б) – диэлектрическая проницаемость

ческом составе полученных плёнок ZrO_2 были подтверждены с помощью рентгеновской дифракции скользящего падения (GIXRD) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS). По мере уменьшения размеров устройства ухудшение электрических характеристик после испытаний на изгиб уменьшалось, и стабильная работа TFT наблюдалась даже после 5000 циклов испытаний на изгиб с радиусом изгиба 2,5 мм. Это связано с тем, что относительно небольшие устройства с меньшей вероятностью будут содержать структурные дефекты или микротрещины, вызванные механическим напряжением [1].

На рис. 3 показан эволюционный процесс формирования плёнок из растворов под воздействием плавления. Синтез горения требует меньше внешнего источника энергии для разложения органических лигандов и построения оксидных решёток из-за внутренней энергии, генерируемой экзотермическими реакциями, по сравнению с обычной системой ZrO_2 . Следовательно, такие плёнки можно изготавливать при более низких температурах.

Структурные характеристики плёнок, используемых в качестве диэлектрика в транзисторах, оказывают значительное влияние на ток утечки затвора изготовленных устройств.

В частности, в поликристаллических диэлектрических слоях границы зёрен могут приводить к диффузии ионов и действовать как пути утечки, потенциально способствуя значительному увеличению тока утечки. Исследователями также установлено, что токопроводящие плёнки демонстрируют незначительные пики, связанные с моноклинной структурой в диапазоне 50–60°C [5].

Некоторые улучшенные характеристики токопроводящих плёнок основываются на анализе ТГА, показывающем, что преобразование прекурсоров в процессе сгорания происходит при значительно более низких температурах по сравнению с обычной технологией производства (аналогами) токопроводящих плёнок, менее гибких и разработанных ранее [8]. Разница температур предполагает снижение потребности во внешней энергии во время конверсии оксида из-за внутренней энергии, генерируемой экзотермической реакцией прекурсоров горения. Используя температуру конверсии, полученную из термического анализа в качестве эталона, мы определили, что эффективное преобразование в плёнки ZrO_2 может происходить уже при +250°C аналогично технологии изготовления плёнок на основе SnO_2 (в ранних технологиях необходимая температура при производстве

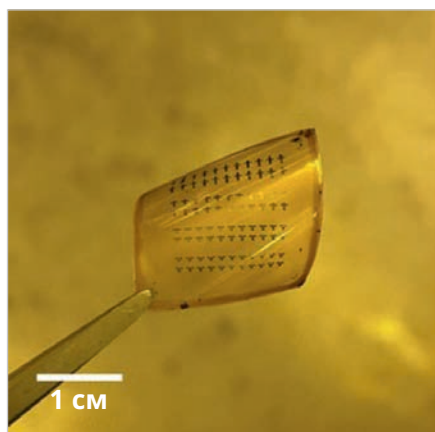


Рис. 6. Элементы фотоструктурированных плёнок ZnO_2 и структуры MIS

зависимости от частоты воздействия на плёнки нового образца.

Эти значения можно сравнить с ранними разработками на основе испытаний в условиях вакуума оксидными диэлектриками с очень хорошими изолирующими свойствами [3, 5]. Так, токопроводящие плёнки старых разработок в испытаниях показали высокую частотную зависимость диэлектрической проницаемости, особенно в диапазоне НЧ от 20 до 103 Гц. А плёнки ZnO_2 , полученные методом горения, показывают диэлектрическую проницаемость $13,22 \pm 0,43$ при частоте 20 Гц и стабильное распределение диэлектрических проницаемостей во всём диапазоне частот от 20 до 106 Гц. Уменьшение диэлектрической проницаемости во всём диапазоне частот составляет 7,6% для плёнок, полученных методом горения, тогда как для обычных плёнок оно составляло 33,78%. Это является заметной разницей.

Обычные токопроводящие плёнки соотносят с зависимостью от высокой частоты импульсов (изменяющие свойства токопроводимости при изменении частоты воздействия), что также учитывают разработчики РЭА при конструировании модулей. Высокая диэлектрическая проницаемость токопроводящих плёнок на низких частотах объясняется относительно высоким соотношением М-ОН в материале, а это способствует поглощению полярных молекул воды [6].

После применения метода вакуумного осаждения можно сделать вывод о том, что низкая плотность тока утечки и независимые от частоты диэлектрические постоянные делают новые плёнки перспективными для использования разработчиками РЭА по харак-

теристикам изоляции и диэлектрической постоянной.

Увеличение тока утечки, связанное с границами проводящих областей, может быть смягчено присутствием аморфной фазы. Благодаря сочетанию свойств плёнки на основе ZnO_2 , полученные методом горения, обладают улучшенными диэлектрическими свойствами по сравнению с обычными плёнками, отожжёнными при температуре $+400^\circ\text{C}$.

Электрические характеристики и особенности новейших токопроводящих плёнок

TFT работают при низком напряжении возбуждения 3 В с низким током утечки затвора примерно 10^{-9} А, демонстрируя пригодность для работы оксидных TFT при низком напряжении благодаря присутствию аморфной фазы и оксида. Самая низкая частота, которую исследователи смогли измерить, составляет 20 Гц. Высокочастотная зависимость, типично наблюдаемая в диэлектрических проницаемостях из-за гидроксильных групп и подвижных ионов в обработанных раствором диэлектриках, может привести к переоценке подвижности в TFT с диэлектриками High-k.

Подвижность оксидных TFT может быть получена путём умножения подвижности, полученной с помощью обычных методов, на масштабный коэффициент. Масштабные коэффициенты для рассматриваемого типа токопроводящих плёнок составляют 0,59 при низком V_{gs} и 0,89 при высоком V_{gs} (напряжение гистерезиса) соответственно. Морфология поверхности плёнок, полученная с помощью измерений атомно-силовой микроскопии (АСМ), эти выводы вполне подтверждает, как и среднеквадратичная шероховатость (RMS) при толщине плёнок 0,563 нм, что указывает на очень гладкую поверхность.

Условная гладкость поверхности элемента помогает улучшить движение электронов (носителей) и одновременно предотвращает ухудшение характеристик проводимости устройства, вызванное проникновением на границе диэлектрик–полупроводник.

Как важная электрическая характеристика, стабильность также является решающим фактором в производительности TFT и учитывается при практическом использовании обра-

ботанных в растворе оксидных TFT. При положительном напряжении смещения (PBS) и отрицательном напряжении смещения (NBS) сдвиг под воздействием времени будет разным. В течение времени напряжения 3600 с, рассматриваемого для мониторинга стабильности большинства оксидных TFT, новые токопроводящие плёнки показали сдвиг $+0,22$ В при PBS и $-0,18$ В при NBS. Таким образом, сдвиг V_{th} , вызванный NBS, относительно меньше по сравнению с PBS. Как видно на рис. 5, это связано с открытыми слоями SnO_2 изготовленных устройств. В отличие от NBS, где в первую очередь испытывается влияние на границе диэлектрик–полупроводник, PBS вызывается дополнительным воздействием кислорода, поглощаемого через обратный канал в условиях окружающей среды.

Процесс изготовления гибких TFT-транзисторов

Для производства устройств MIS растворы наносились методом центрифугирования на сильно легированный p -ионом кремний (Si) при вращении 3000 об/мин в течение 50 с, после чего следовала минутная сушка при температуре 150°C для формирования токопроводящих слоёв. В исследованиях этот процесс повторялся неоднократно для контроля и наращивания толщины слоёв. Перед нанесением покрытия пластины Si подвергались 10-минутной обработке УФ/озоном для контроля поверхностной энергии. В результате площадь верхних электродов составляет всего 120 μm^2 при толщине 50 нм. Перед процессом отжига производилось механическое удаление плёнок покрытия вдоль нанесённых электродов для уменьшения краевых токов и токов утечки. Детали фотоструктурированных плёнок ZnO_2 и структуры MIS показаны на рис. 6.

Гибкие TFT ZnO_2/SnO_2 изготавливаются на подложках PI. Перед нанесением покрытия PI поливиниловый спирт (PVA) использовался в качестве жертвенного слоя на подложке-носителе для облегчения отсоединения PI. Раствор, приготовленный путём растворения 0,1 г PVA в 40 мл DI-воды, наносился методом центрифугирования на подложку-носитель при 2000 об/мин в течение 30 с, а затем высушивался при 110°C в течение 90 с.

Поверхность токопроводящей плёнки, отожжённая поверх буферного слоя,

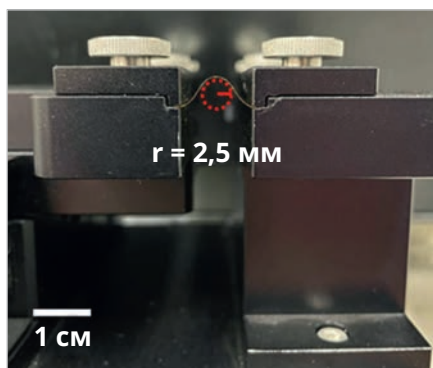


Рис. 7. Изображение гибких TFT в изогнутом состоянии для испытаний на механическую нагрузку

без деформации и трещин показана на рис. 6. В TFT с нижним затвором обязательным условием к производству затворного электрода является адгезия с гибкой подложкой.

В качестве нижнего затворного электрода выбран Cr. Затем ZrO_2 и SnO_2 были нанесены в качестве диэлектрического и полупроводникового слоёв соответственно, а Cr (50 нм) был нанесён в качестве S/D электродов для изготовления TFT с нижним затвором и верхним контактом. Для подтверждения эффекта масштабирования размеры гибких каналов TFT испытаны при разной толщине и растяжимости (W/L) L = 100, 50 и 20 мкм. После процесса плёнка PI была погружена в DI воду для растворения PVA и отслоения его от несущей подложки.

Механическая стабильность гибких TFT-дисплеев определяется следующим. Для гибких TFT важно иметь стабильные электрические характеристики при механическом напряжении. Чтобы сравнить механическую гибкость, изменяющуюся в зависимости от размеров устройства, исследователи применили повторяющееся растягивающее напряжение с радиусом изгиба 2,5 мм в течение 5000 циклов к гибким TFT, как показано на рис. 7, и затем наблюдали изменения в их электрических характеристиках.

Характеристики процесса изготовления новейших токопроводящих плёнок и тонкоплёночных полупроводников

Положение нейтральной плоскости составляет примерно 26,93 мкм от низа сложенных плёнок. Деформация в месте расположения TFT составляет приблизительно 0,53% при радиусе изгиба 2,5 мм [4].

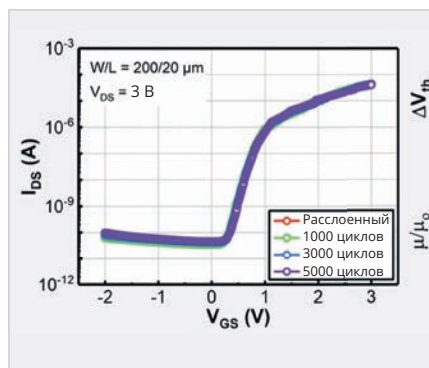


Рис. 8. Электрические характеристики гибких TFT-транзисторов

Гибкие TFT ZrO_2/SnO_2 (параметр W/L = 200/20 мкм) продемонстрировали устойчивые электрические характеристики в изменениях площади растяжения с $26,16 \pm 1,73 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $SS = 0,125 \pm 0,005 \text{ В/дек}$ и $Ion/Ioff 1,13 \times 10^6$, по сравнению с устройствами аналогичного назначения, но изготовленными на жёстких подложках. Это улучшение можно объяснить увеличенной инжекцией носителей заряда из-за изменения конфигурации гибких TFT на затвор (верхний контакт), в отличие от структуры нижнего контакта затвора, используемого в TFT, изготовленных на жёстких подложках. Более гибкие элементы TFT показывают значительный сдвиг по сравнению с TFT на жёстких подложках и работают надёжнее. Чтобы прояснить изменения в режимах работы, обратим внимание на рис. 7, а диаграммы энергетических зон затвора и диэлектрика представлены на рис. 8, 9.

На рис. 8 показаны некоторые передаточные характеристики тонкоплёночных транзисторов при изгибающем напряжении в течение 5000 циклов при радиусе 2,5 мм, изменяющемся в зависимости от L = 20 мкм. На рис. 9 показаны те же характеристики при толщине подложки 100 мкм при сохранении одинаковых условий при циклах изгиба.

При исследовании механических свойств TFT и сравнении электрических характеристик до и после испытания на изгиб уделялось особое внимание эффекту масштабирования. Как видно из графика рис. 9, TFT с наибольшими размерами каналов (1000/100 мкм) демонстрируют снижение тока включения вместе со сдвигом кривой передачи во время циклов изгиба. Устройства большого размера демонстрируют заметное снижение

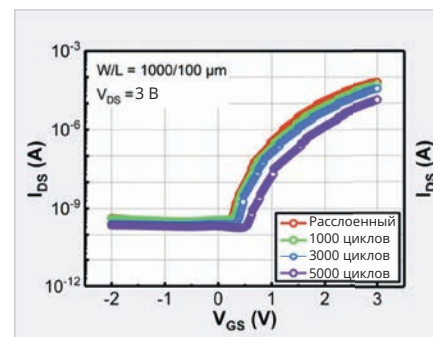


Рис. 9. Те же характеристики при толщине подложки 100 мкм при сохранении одинаковых условий при циклах изгиба

и явный положительный сдвиг V_{th} во время испытаний на изгиб. После 5000 циклов он смещается положительно с 1,27 до 1,65 В, а уменьшается до 46% от своего исходного значения, в то время как параметр SS увеличивается с 0,148 до 0,154 В/дек. Повторяющиеся циклы изгиба вызывают структурные дефекты или микротрещины в таких областях, как интерфейс затвора диэлектрик-полупроводник или интерфейс затвора электрод-затвор-диэлектрик, где концентрируется напряжение. Такие изменения можно объяснить структурными дефектами, вызванными напряжением материалов.

Положение уровня Ферми (EF) в пределах энергетической зоны токопроводящей плёнки оценивалось с использованием ширины запрещённой зоны, полученной из спектров УФ-видимой области. На рис. 10, 11 показаны состав и структура соответственно старых и новых токопроводящих плёнок и эволюция гибких полупроводников. Электроды с меньшей вероятностью будут образовывать микротрещины под механическим изгибающим напряжением, тем самым дополнительно улучшая механические свойства TFT.

По мере уменьшения размеров устройств изменения в характеристиках передачи и основных параметрах TFT заметно уменьшаются. В частности, маленькие по формат-фактору элементы (200/20 мкм) продемонстрировали надёжную механическую стабильность даже при повторяющемся изгибающем напряжении, а также превосходные характеристики TFT.

Результат можно объяснить разной нагрузкой выхода электрода затвора в гибких TFT по сравнению с изготовленными на жёстких подложках, а также структурным изменением контакта нижний затвор – верхний затвор,

что приводит к увеличению инжекции носителей. Так, исследователи подтвердили эффект масштабирования на механические свойства TFT, сравнив электрические характеристики через повторяющиеся циклы изгиба. По мере уменьшения размеров устройства изменения в характеристиках передачи и ухудшение характеристик после испытаний на изгиб уменьшались. Это связано с тем, что относительно небольшие устройства с меньшей вероятностью будут содержать структурные дефекты или микротрещины, вызванные механическим напряжением. Кроме того, самый маленький TFT продемонстрировал надёжную механическую стабильность, выдержав 5000 циклов испытаний на изгиб при радиусе изгиба 2,5 мм. Поэтому синтез горения может быть использован в качестве подходящего процесса для массового производства электронных и гибких устройств на основе золь-гель-процесса на основе оксида металла.

Выводы

Прорывные технологии решают актуальные технические задачи по созданию гибких термоэлектрических устройств, преобразующих тепло тела человека в электроэнергию. Разработка электронных датчиков-преобразователей температуры, движения и потоотделения кожного покрова человека в электрический ток, созданная в форме гибкой плёнки, сможет заменить привычные аккумуляторы смартфонов, а с применением эффекта Пельтье даже обеспечить внутреннее охлаждение электронных чипов и микросборок электронных устройств. Рассмотренная в статье разработка имеет ценность не только как отдельная технология, но и как метод создания и совершенствования устойчивых в разных средах и условиях автономных источников энергии для носимой электроники, что, несомненно, способствует более эффективной и долговременной работе смартфонов и носимого компьютерного оборудования. Особенная перспектива видится в изучении и последующих разработках в области термоэлектрической технологии на основе селенида серебра, поскольку он потенциально дешевле и устойчивее традиционных материалов. В данном случае гибкость материалов показывает широкие возможности. Так мы ещё и приблизились к практике применения носимых электронных устройств, получающих энергию от тепла тела.

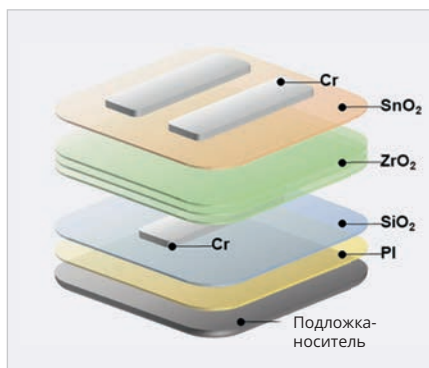


Рис. 10. Состав и структура токопроводящих плёнок с относительно твёрдой подложкой ранней разработки

Функциональные и свободные (гибкие) по форме дисплеи являются важнейшими компонентами для технологического совершенствования носимой РЭА, робототехники и человеко-машинных интерфейсов. Так, подложка для снятия напряжений помогает OLED-дисплеям растягиваться в двух измерениях [8]. Среди новых разработок также высокопроизводительный и компактный вибрационный (пьезоэлектрический) сборщик энергии для самозаряжающихся носимых устройств на основе микро-электро-механической системы (МЭМС), диаметр которого составляет всего около 2 см, а усиление вибрации выполнено из металла. Новая эра двумерных сегнетоэлектрических материалов со слоистыми ван-дер-ваальсовыми кристаллическими структурами открылась в третьем десятилетии XXI века, и уже создан новый класс материалов, представляющий большой интерес для РЭА будущего.

Литература

1. Бонхо Джанг, Хёк-Джун Кwon и др. Низкотемпературные плёнки ZrO_2/SnO_2 для высокопроизводительных гибких тонкоплёночных транзисторов. *Npj Flexible Electronics*, 2024; 8 (1). URL: <https://www.nature.com/articles/s41528-024-00362-8>.
2. Володина Е. Учёные разработали плёнку, которая может заряжать смартфоны от тепла тела. URL: <https://knife.media/uchyonye-razrabotali-plyonku-kotoraya-mozhet-zaryazhat-smartfony-ot-tepla-tela/>.
3. Джанг Б., Кwon Х.-Дж. и др. Модуляция барьера Шоттки тонкоплёночных транзисторов с нижним контактом с помощью синтеза горения на основе хлорида. *J. Mater. Sci. Technol.* 148, 199–208 (2023).

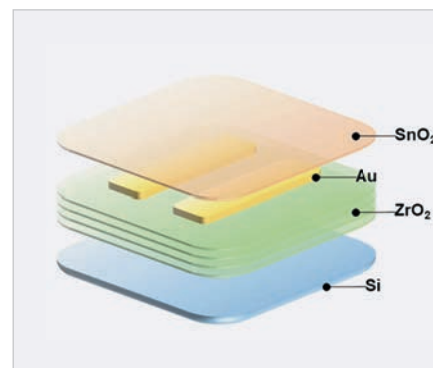


Рис. 11. Эволюция гибких полупроводников: структура инновационных токопроводящих плёнок

4. Джанг Б., Ким Дж., Кwon Х.-Дж. и др. Стабильное поведение переключения низкотемпературных устройств RRAM на основе ZrO_2 , реализованное с помощью фототаблонирования с помощью синтеза горения. *J. Mater. Sci. Technol.* 189, 68–76 (2024).
5. Джанг Б. и др. Низкотемпературный процесс растворения с использованием горения для высокопроизводительных тонкоплёночных транзисторов SnO_2 . *Ceram. Int.* 48, 20591–20598 (2022).
6. Релиз новой разработки токопроводящих плёнок. URL: www.sciencedaily.com/releases/2024/12/241212145818.htm.
7. Сгибаемые электронные детали нагреваются сами по себе, как «тепловой пакет», и снижают температурный барьер производства. *ScienceDaily*, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology. URL: www.sciencedaily.com/releases/2024/12/241202124236.htm; URL: https://www.dgist.ac.kr/prog/bbsArticle/BBSMSTR_000000000188/view.do.
8. Хоссейни М., Навроцкий Р.А. Обзор развития тонкоплёночных транзисторов и их технологий для гибкой электроники // *Микромашины*. 2021. № 12. С. 655.
9. Чэнь В., Мэтью Даргуш М., Цин (Макс) Лу и др. Наносвязки продвигают гибкие термоэлектрики, напечатанные методом трафаретной печати. 2024.
10. Breakthrough brings body-heat powered wearable devices closer to reality. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2024/12/241212145818.htm>.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Автоматический ввод резерва (ABP) REM

Производственная группа REMER представляет новую продуктовую линейку – PDU с автоматическим вводом резерва (ABP). Оборудование разработано подразделением «REMER автоматизация», специализирующимся на разработке интеллектуальных устройств. Блок ABP предназначен для бесперебойного электроснабжения IT-оборудования через один блок питания с двумя независимыми вводами.

ABP REM в случае потери напряжения на основном вводе или отклонении параметров сети за допустимые пределы автоматически переключает питание на резервный ввод. Переключение с одного ввода на другой происходит в течение 12...14 мс и не прерывает работу подключённого оборудования. ABP полностью построен по цифровой схеме с двумя гальванически изолированными блоками питания и блоком коммутации из восьми реле. В качестве приоритетного может быть назначен любой из вводов, либо может быть установлен режим AUTO, в котором ввод, используемый в настоящий момент, считается приоритетным. Настройка

и управление осуществляются локально через встроенный OLED-дисплей с клавиатурой, через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus-RTU, а также удалённо при подключении ABP к интеллектуальному PDU REM. Индикация режима работы ABP осуществляется при помощи светодиодной мнемосхемы питания. На основном экране ABP отображаются значения входных напряжений, тока и мощности нагрузки на выходе, обозначены активный и приоритетный вводы. Для визуальной оценки качества электроэнергии на дисплей можно вывести осциллограммы напряжения на вводах.

В случае аварийного отключения нагрузки на экране отображаются сообщение об аварии, код ошибки и время, прошедшее с момента отключения нагрузки.

Линейка ABP стандарта 19" представлена однофазными моделями на 16 А с различными типами ввода питания (два шнура длиной 1,8 м с вилкой Schuko или два разъёма C20 на лицевой панели) и комбинациями розеток различных типов (Schuko, C13 и C19).

ABP можно использовать для работы с бюджетными источниками бесперебойного питания (ИБП):



- с выходным напряжением в форме модифицированной синусоиды (трапеции);
- со схемой bypass на выходе, кратковременно прерывающей питание при переходе на батарею.

Стандартные варианты применения:

- ввод А (трансформаторная линия) – ввод В (генераторная линия);
- ввод А (трансформаторная линия) – ввод В (трансформаторная линия).

На заказ могут быть изготовлены модели с многочисленными дополнительными опциями.



Промышленный ТЕХНОПАРК

Производство, разработка и поставка постоянных резисторов, аттенюаторов и чип-индуктивностей:

- Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (от 50 Вт – 2000 Вт)
- Аттенюаторы ПР1-25 (от 50 Вт – 2000 Вт)
- ТПИ – тепловые чип-перемычки
- СВЧ-резисторы
- Мощные СВЧ-резисторы Р1-170 (до 1000 Вт)
- Силовые резисторы Р1-150М (до 1500 Вт)
- Наборы резисторов НР1-82
- Чип-резисторы Р1-8В (А, И, С) соответствуют требованиям стандарта АЕС-Q200



Современная производственная база



Высокое качество



Индивидуальный подход к потребителю



Изделия по вашему ТЗ



Реклама

Связаться с нами: **8 800 444 30 99**

г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6
e-mail: info@erkonpark.ru

erkonpark.ru