

Биоразлагаемые источники питания: необычные технические решения и перспективы

Жосс Бомон

В статье приводятся сведения об инновационных разработках безопасных биоразлагаемых элементов питания как предтечи создания съедобных электронных модулей и блоков для медицинской диагностики организма человека, повышения его живучести и приумножения энергетического потенциала. Черпая вдохновение в свойствах живых организмов, ферментов, использующих окислительно-восстановительные кофакторы для биогенераторов, автор представляет описание перезаряжаемой съедобной АКБ из доступных материалов в проекции создания и других природных источников возобновляемой энергии.

Учёные утверждают, что, если по месту жительства отключат электричество, они смогут некоторое время освещать дом при помощи лимонов. Однако в каждом из подобных инфоповодов, вовсе не предназначенных для того, чтобы их воспринимали буквально, есть рациональное зерно. Современная электроника была и есть развивающейся областью с перспективами и успехами в разработке легкоусвояемых (безопасных биоразлагаемых) устройств с пищевыми ингредиентами и добавками. Действительно безопасных, и на протяжении нашего обзора покажем это аргументированно.

Прогресс медицинских технологий

Научно-технический прогресс в здравоохранении способствовал увеличению средней продолжительности жизни человека. Велика в этом роль медицинской диагностики. Диагностические методы, например, используемые для мониторинга желудочно-кишечного тракта, совершенствуются благодаря современной электронике. Проглатываемые электронные медицинские устройства помогают заменить неудобные для пациента инвазивные медицинские процедуры, такие как гастроскопия и колоноскопия, устройства размером с таблетку, содержащими видеокамеры и датчики химического состава среды, в том числе pH. Медицинские диагностические процессы все ещё связаны с обязательным наблюдением дипломированного специалиста, что значительно увеличивает стоимость медицинских операций и

снижает эффективность диагностических устройств. Обоснованное внимание к экологически чистым и безопасным проглатываемым миниатюрным электронным устройствам привело к новым разработкам, реализация которых не обязательно связана с постоянным наблюдением пациента медицинским специалистом. Съедобный датчик с функцией беспроводной передачи данных (передатчик) даёт развитию отрасли огромные перспективы. Разносторонние и неограниченные способы реализации креативной инженерной мысли довели социум уже до того, что обозначился термин «съедобные электронные устройства» – СЭС. Действительно, биоразлагаемые элементы уже много лет используются в медицине, помогают в диагностических процедурах, в мониторинге желудочно-кишечного тракта, терапии, других медицинских исследованиях жизненно важных органов человека, в оперативном определении качества продуктов питания. СЭС предполагает создание модулей и датчиков с не менее безопасными и съедобными источниками питания. Это действительно инновационная и быстроразвивающаяся область современной электроники.

Как элемент СЭС разработана перезаряжаемая съедобная АКБ, изготовленная из материалов, съедаемых в повседневной жизни. На основе знаний об окислительно-восстановительных свойствах живых организмов путём иммобилизации рибофлавина и кверцетина, типичных пищевых ингредиентов и пищевых добавок на активированном угле разработана новая маломощная АКБ, способ-

ная обеспечить электропитание небольших электронных устройств. В качестве анода используется рибофлавин, а в качестве катода – кверцетин. Электроды помещены в пчелиный воск. Первые варианты рассматриваемой АКБ вырабатывали разность потенциалов (напряжение) 0,65 В с силой постоянного тока 48 мкА; эти значения оставались относительно неизменными в течение 12 минут, затем изменялись в сторону уменьшения. Этот опыт даёт перспективу новым исследованиям безопасных электронных приложений для качественной и оперативной медицинской диагностики, лечения и неизведанных ранее способов контроля качества продуктов питания.

Из истории

Основа любого гальванического источника тока неизменно связана с опытом и устройством, созданным Алессандро Вольта. Но предпосылки к изобретению первого химического источника электрического тока возникли почти случайно. В конце XVII века итальянский учёный Луиджи Гальвани занимался исследованием реакций животных на внешние воздействия разного свойства. Присоединял полоски из разных металлов в разных местах лягушачьей лапки и наблюдал эффект. Опыты Гальвани стали основой исследований Алессандро Вольта. Внутри сухого элемента питания имеются 3 основные и важные для понимания принципа действия части. Отрицательный электрод (–), положительный электрод (+) и находящийся между ними электролит, представляющий смесь химических веществ в той или иной форме. Постоянный ток в электрической цепи возникает по известному физическому закону: химические реакции заставляют электроны двигаться от отрицательного электрода через замкнутый контур – только при его наличии возникает электрическая цепь – к положительному электроду. По мере того как химические ингредиенты расходуются, ток уменьшается. Это общий принцип работы, который при

постоянном роде тока касается всех источников электропитания вне зависимости от их мощности, формы или состава, и также биоразлагаемого, или «естественного», как овощные гальванические элементы, качества.

Если анализировать то, что перед глазами, и обрывочные сведения о мировых инновационных проектах, может показаться, что элементы и разработки в области «съедобной электроники», как и полвека назад, находятся в зачаточном состоянии. Однако это не так. В связи с развитием медицинской техники и микроэлектроники в недавние годы созданы устройства, соответствующие критериям полностью съедобного безопасно разлагаемого в желудке человека или животного электронного элемента. Уже запатентован электрохимический сенсор Вана – для обнаружения молекул катехола, мочевой и аскорбиновой кислот, дофамина, ацетаминофена и др. Цзян и др. разработали съедобный датчик, реагирующий на плотность и жёсткость жидкости pH, радиочастотный фильтр и микрофон. Созданием «съедобного» датчика размораживания и не менее съедобной таблетки для воздействия на ткани организма мир обя-

зан разработчику из Италии Марио Кайрони [10]. Причём речь идёт именно о недавних разработках – которым не более 10 лет. Недавние достижения в области разработки полупроводниковых материалов на основе натуральных красителей и «транзисторов с медовым затвором» подтверждают перспективы и потенциал разработчиков отрасли, то есть возможность создания полностью «съедобных модулей» в обозримом будущем. Эти примеры съедобных датчиков и не менее съедобных активных электрических компонентов чрезвычайно способствуют разработкам и более сложных «съедобных электронных систем» (СЭС). При этом для стабильной работы СЭС требуется надёжный источник питания. Уже известные электрохимические источники энергии, такие как ионисторы, суперконденсаторы и АКБ, могут хранить энергию с помощью технически реализованного двойного электрического слоя и посредством внутренних окислительно-восстановительных реакций, в итоге дающих разницу потенциалов на противоположных электродах. Но суперконденсаторы как элементы СЭС не подходят в качестве источников питания из-за недостаточной плотно-

сти энергии и изменяющегося рабочего напряжения [8]. Для пищевых продуктов предпочтительным источником питания являются электронные гальванические элементы (батареи). Альтернативой батареям являются съедобные топливные элементы, действующие за счёт сжигания этанола, но низкая объёмная плотность энергии делает их пока непригодными для питания СЭС [7].

Результаты интересных и продолжающихся исследований в Istituto Italiano di Tecnologia (ИИТ – Итальянский технологический институт) при поддержке гранта Европейского исследовательского совета опубликованы за авторством Ivan K. Ilic, Valerio Galli, Leonardo Lamanna, Pietro Cataldi, Lea Pasquale, Valerio F. Annese, Athanassia Athanassiou, Mario Caironi [1, 10]. Исследование проведено группой Марио Кайрони, координатора лаборатории печатной и молекулярной электроники Центра ИИТ в Милане (Италия). Кайрони сосредоточился на изучении электронных свойств продуктов питания и их побочных продуктов, чтобы создать новые «съедобные электронные материалы». В 2019 году Caironi выиграла консолидационный грант



ЭРКОН

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

ПРОИЗВОДСТВО, РАЗРАБОТКА И ПОСТАВКА ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ, АТТЕНУАТОРОВ И ЧИП-ИНДУКТИВНОСТЕЙ

- Современная производственная база
- Высокое качество
- Индивидуальный подход к потребителю
- Изделия по вашему ТЗ

НОВИНКИ

Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (от 50 Вт-2000 Вт)
 Атенуаторы ПР1-25 (от 50 Вт - 2000 Вт)
 ТПИ - тепловые чип-перемычки
 СВЧ-резисторы Р1-160 (до 40 ГГц)
 Мощные СВЧ-резисторы Р1-170 (до 1000 Вт)
 Силовые резисторы Р1-150М (до 1500 В)

603104, Г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6.
 тел.: 8 (831) 202 - 24 - 34 (многоканальный)
 8 (831) 202 - 25 - 52 (отдел продаж)
 E-mail: gr@erkon-nn.ru
 www.erkon-nn.ru

Реклама



Рис. 1. Готовая к употреблению биоразлагаемая батарея производства Instituto Italiano di Tecnologia

ERC в размере 2 миллионов евро для проекта ELFO, изучающего сферу СЭС.

Коммерческие литий-ионные аккумуляторы, которые сегодня питают большинство портативных электронных устройств, подвергаются восстановлению оксидов металлического лития на катоде и окислению литированного графита на аноде во время разряда. Li-ion батареи и АКБ других технологий (к примеру, свинцово-кислотные) не подходят для питания СЭС, ибо содержат токсичные материалы. О том, какие материалы используют в современных медицинских технологиях совместно с биоразлагаемыми полимерами, рассказано в [5].

К примеру, при дыхании человека усиливаются окислительно-восстановительные реакции. Говоря терминами биохимиков, окисляется никотинамидадениндинуклеотид (НАД), высвобождая электроны, а жизненно важный для эффективной и длительной мозговой деятельности убихинон восстанавливается из хинона в гидрохиноновую форму. Такие безвредные окислительно-восстановительные пары могут быть использованы для создания «съедобных батарей». Согласно более ранним исследованиям, был успешно испытан перезаряжаемый элемент питания Беттингера (и др.), где в качестве анода использовался меланин, а в качестве катода – оксид марганца [6]. Батарея функционировала, пока оксид марганца восстанавливался, а меланин окислялся. Однако оксид марганца можно употреблять только в небольших количествах, поскольку адекватная (безопасная) суточная норма марганца для человека составляет 3 мг, то есть примерно 50 мкг на 1 килограмм массы тела. Энергетический заряд, который могли обеспечить такие элементы СЭС, ограничен, и существует необходимость в

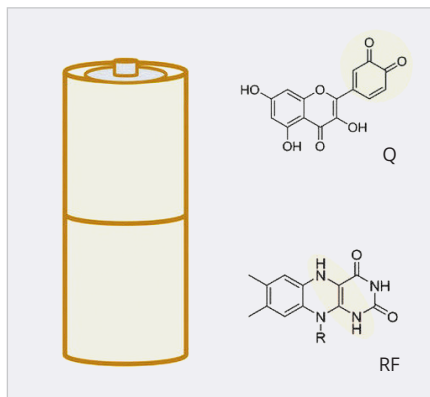


Рис. 2. Наглядная иллюстрация химического состава АКБ для СЭС

разработке инновационных батарей с использованием материалов с более высокой безопасностью – относительно параметру «съедобности».

Инновационные биоразлагаемые СЭС

Сведения о первой АКБ, прошедшей лабораторные испытания для СЭС и основанной только на органических окислительно-восстановительных материалах, опубликованы в 2023 году. Материалы, использованные при формировании батареи, – обычные пищевые ингредиенты и добавки, которые человек может без вреда употреблять в адекватных количествах >100 мг ежедневно. Вот как рассказывают об этом авторы исследования [9].

«После тестирования электрохимических характеристик композитов установили две альтернативы катодных и анодных материалов. Мы выбрали материалы с самым высоким и самым низким окислительно-восстановительным потенциалом, а именно рибофлавин (витамин B₂) и кверцетин, и собрали батарею, используя съедобные токопроводящие оболочки. Сначала мы приготовили композит из редокс-активных пищевых добавок и ингредиентов с активированным углём – токопроводящей пищевой добавкой для стимуляции движения электронов к окислительно-восстановительным центрам. Такую батарею можно использовать для питания съедобных электронных устройств, работающих вне человеческого тела, а также работающих внутри, если оболочка адаптирована для конкретного применения. Хотя «перезаряжаемость» биоразлагаемой батареи – бесполезное свойство при кратковременном использовании внутри человеческого тела, другие съедобные электронные устройства, рабо-

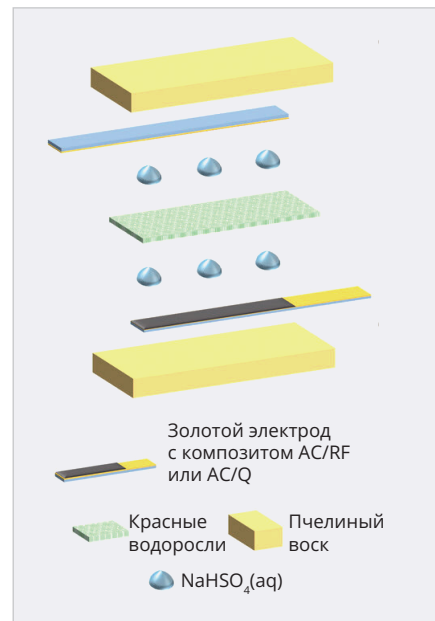


Рис. 3. Редокс-активные материалы IC и RF

тающие вне человеческого тела, можно перезаряжать, продлевая срок их службы. Это достижение не только позволяет разрабатывать съедобную электронику, но также может проложить путь к замене коммерческих батарей в устройствах, принимаемых внутрь, снижая риск при их проглатывании.

Готовая биоразлагаемая батарея представлена на рис. 1. Из особенностей отметим, что редокс-активные рибофлавин и кверцетин включены в композиты с активированным углём, чтобы обеспечить поток свободных электронов от и к окислительно-восстановительным центрам. Это обеспечивается подходящим растворителем. IC (индигокармин), RF (рибофлавин) и Q (кверцетин) растворимы в воде, но для облегчения диспергирования активированного угля использовалась смесь воды и этанола. Поскольку ЭА (эллаговая кислота) более растворима в этаноле, чем в воде, для приготовления этого композита использовали чистый этанол. Композиты наносились на золотые съедобные токопроводящие оболочки и связывались этилцеллюлозой. Батарею закрывали сепаратором из водорослей нори, пропитанным водным раствором гидросульфата натрия. Анодный композит с рибофлавином показал отчётливую окислительно-восстановительную активность с разрядной ёмкостью до 36 мА·ч·г⁻¹, тогда как катодный композит с кверцетином достигал 18 мА·ч·г⁻¹. Окислительно-восстановительная активность

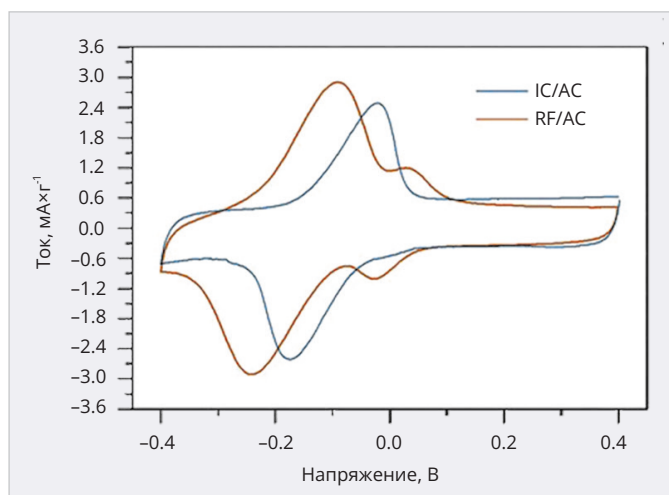


Рис. 4. Циклическая ВАХ композитов IC/AC и RF/AC при уровне 5 мВ/с

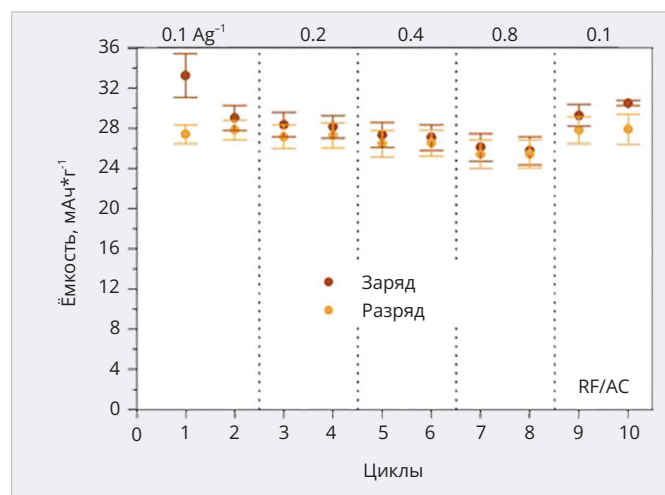


Рис. 5. Циклические вольтамперограммы RF/AC при различных скоростях сканирования

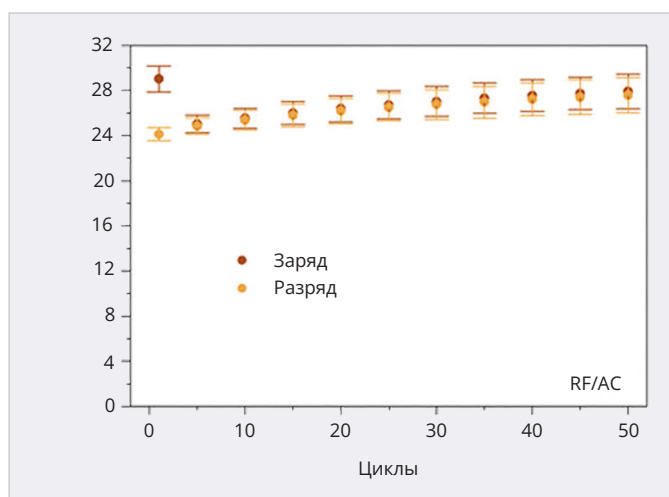


Рис. 6. Гальваностатическая зарядно-разрядная способность композита RF/AC при различных скоростях зарядки

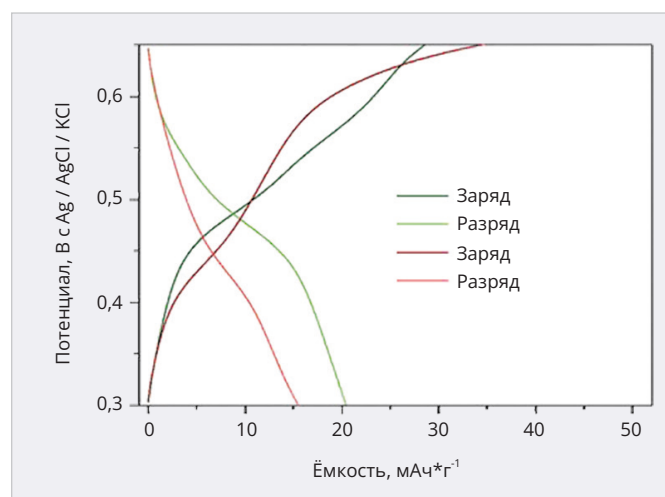


Рис. 8. Эксперимент с последующими циклами гальваностатической зарядки-разрядки

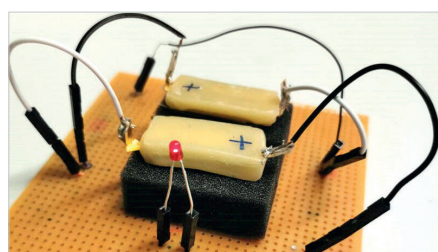


Рис. 7. Готовая батарея, подключённая в электрическую цепь

рибофлавина на 0,7 В ниже, чем у кверцетина. Полностью заряженная батарея продемонстрировала максимальное напряжение 0,65 В и ёмкость $7,2 \text{ мА} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$. Потенциально масштабируемая «съедобная батарея», инкапсулировавшая анод и катод съедобным пчелиным воском, позволяет генерировать ток 48 мкА в течение > 12 минут при использовании элемента с активной площадью 1 см^2 . Но даже этот размер (формат) считается громоздким.

Основа, принципы и результаты исследований

Редокс-активные пищевые добавки и ингредиенты состоят из молекул, обладают низкой электропроводностью и пока не могут использоваться отдельно в качестве электродов аккумулятора. Чтобы решить проблему проводимости электрического тока, основные элементы смешали с активированным углём (АС, E153). В лабораторных условиях протестированы 2 редокс-активные пищевые добавки: индигокармин (IC, E132) и рибофлавин (RF, E101), а также 2 пищевых ингредиента: кверцетин (Q – флавоноид, обнаруженный в каперсах) и эллаговая кислота (ЭА, полифенол, распространённый в пищевых продуктах, в частности в гранате). На рис. 2 представлена наглядная иллюстрация химического состава АКБ для СЭС. К примеру, сепаратор, выбранный для АКБ СЭС, чтобы избежать

короткого замыкания, изготовлен из морской воды. Затем электроды помещены в пчелиный воск, с выпуском по два контакта из пищевого золота (используемого кондитерами).

Молекулы образуют плотный композит с активированным углём, поскольку они адсорбируются на поверхности. Композиты вводили в электроды путём связывания пищевой добавкой, растворимой в этаноле этилцеллюлозой (E462). Из-за его высокой электропроводности в качестве токосъёмных выводов использовалось пищевое декоративное золото (E175), ламинированное на этилцеллюлозу. Для активных компонентов анодов протестированы редокс-активные материалы: IC и RF (рис. 3). Пищевой краситель IC, не имеющий биологической функции окислительно-восстановительного медиатора, используют в качестве окислительно-восстановительной субстанции для хранения энергии. Материал RF явля-

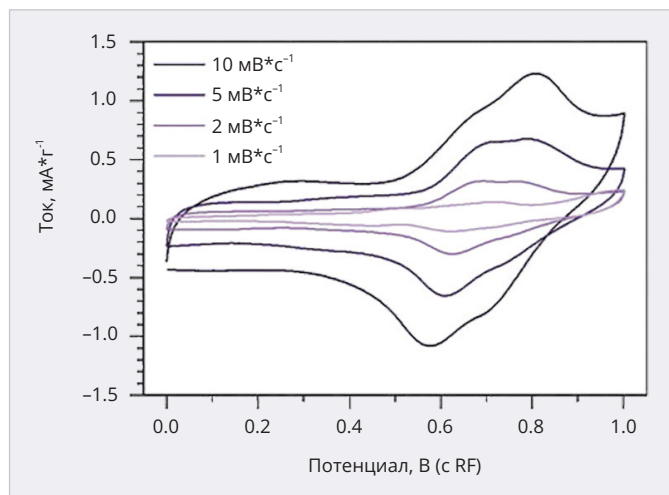


Рис. 9. ВАХ заряженной батареи при различных скоростях сканирования

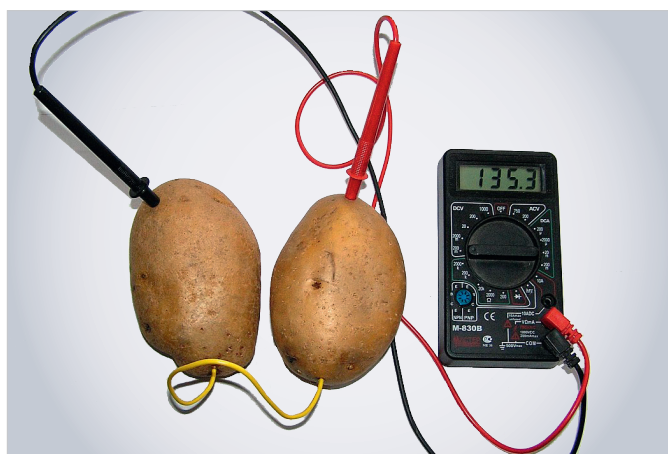


Рис. 11. Эксперимент с двумя картофелинами, последовательно подключёнными в электрическую цепь

ется распространённой пищевой добавкой, естественным окислительно-восстановительным кофактором, хорошо известным как витамин B_2 . Ранее RF использовался в качестве катодного материала в литий-ионных батареях и анодного материала в водных окислительно-восстановительных батареях. В сравнении со стандартным водородным электродом (SHE) при $pH = 0$ обе составляющие АКБ СЭС демонстрируют окислительно-восстановительные реакции, что сделало их хорошим выбором для анодных материалов в электролитах. В данном случае задействован водный раствор гидросульфата натрия ($NaHSO_4$, E514), представляющий пищевую соль с незначительной кислотностью, это означает, что протоны и катионы с наибольшей подвижностью в воде активно используются для транспортировки заряда. Все измерения проводились с композитами малых молекул IC и RF, смешанными с AC. На рис. 4 показана циклическая ВАХ композитов IC/AC и RF/AC

при уровне 5 мВ/с. Зарядно-разрядная ёмкость IC/AC и RF/AC не демонстрирует значительного ухудшения в течение 6 циклов, при этом разрядная ёмкость составляет ≈ 26 и $36 \text{ mA} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$ для IC/AC и RF/AC соответственно. На рис. 5 представлены циклические вольтамперограммы RF/AC при различных скоростях сканирования. Ёмкость композитов RF/AC определяется измерениями гальваностатической зарядки-разрядки при токе $0,8 \text{ A} \cdot \text{г}^{-1}$ (см. рис. 5). При этом материалы RF/AC демонстрируют превосходное сохранение ёмкости при увеличении скорости зарядки, таким образом, быстрая зарядка возможна. Кроме того, RF/AC показывает небольшое увеличение ёмкости в течение 50 циклов зарядки-разрядки при $0,8 \text{ A} \cdot \text{г}^{-1}$, достигая значения $\approx 25 \text{ mA} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$. Эффект объясняется перестройками в материале во время зарядки-разрядки, что приводит к лучшей доступности окислительно-восстановительных центров. Эффективность в течение 50 циклов остаётся высокой, выше 98%

[9]. Материал IC подвергается одноэтапному процессу двухэлектронного восстановления, тогда как RF подвергается восстановлению в 2 этапа. Кривые гальваностатической зарядки-разрядки подтверждают наблюдаемые тенденции. Гальваностатическая зарядно-разрядная способность композита RF/AC при различных скоростях зарядки представлена на рис. 6. Относительно высокая разрядная ёмкость RF/AC и более низкий потенциал доминирующего пика/плато сделали данный материал предпочтительным выбором в качестве анода. На рис. 7 представлена готовая батарея, подключённая в электрическую цепь. Полная АКБ собиралась в разряженном состоянии.

EA и Q – пищевые ингредиенты, протестированные как потенциальные катодные материалы. Все измерения проводились с композитами малых молекул EA и Q, смешанными с AC. Хотя Q/AC демонстрирует окислительно-восстановительную активность (ОВА) около 0,5 В по сравнению с

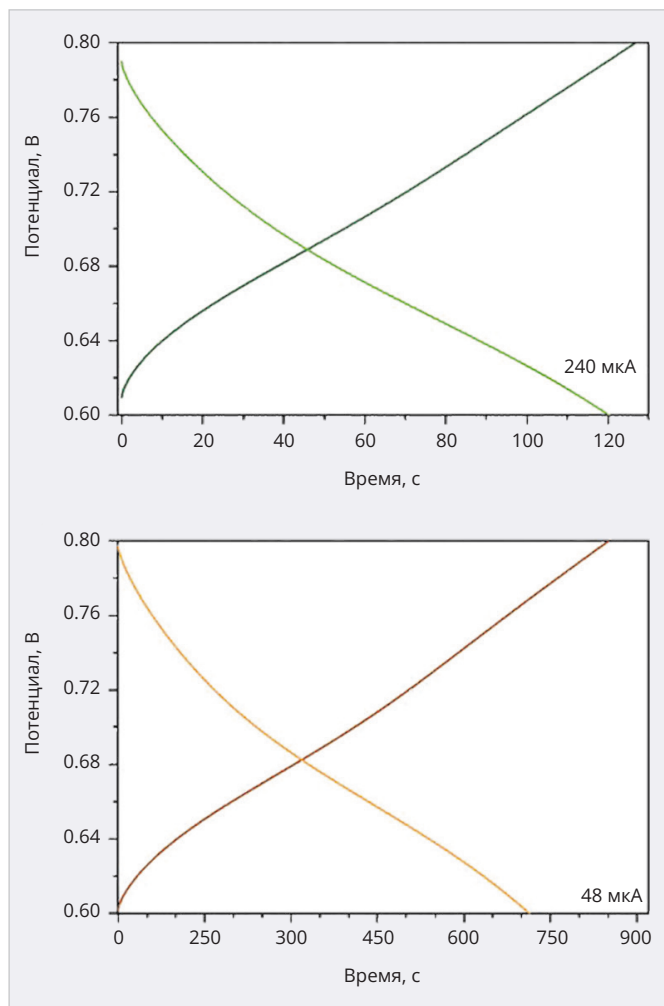


Рис. 10. Гальваностатические зарядно-разрядные способности АКБ СЭС при токе 240 мкА (вверху) и 48 мкА (внизу).

Ag, не было обратимой ОВА ЕА/АС. Наоборот, во время первого цикла зарядки в композитах ЕА/АС наблюдали пик необратимого окисления, поэтому сделан вывод, что композит является окислительно-восстановительным, но необратимым. То же подтверждается экспериментами последующих циклов гальваностатической зарядки-разрядки. Интересно, что (согласно графику рис. 8) для Q/АС заметна некоторая стабилизация около 0,5 В в зависимости от Ag, тогда как для ЕА/АС динамических изменений почти не наблюдается. Измерения гальваностатической зарядки-разрядки указывают на более высокую зарядную, чем разрядную ёмкость в течение первого цикла не только для ЕА/АС, но и для композитов Q/АС. Кроме того, первая высокая зарядная способность электродов Q/АС может быть приписана переменному току, поскольку тот же эффект наблюдался во время первого цикла зарядки чистого переменного тока [9]. Q/АС показывает разрядную ёмкость $\approx 18 \text{ мА} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$, а АС показывает $\approx 10 \text{ мА} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$. Около 28% теоретической ёмкости Q используется в композите Q/АС, поэтому материал выбрали

в качестве катодного материала для «съедобной батареи». Кривые зарядки-разрядки подтверждают окислительно-восстановительную реакцию при $\approx 0,5 \text{ В}$ по сравнению с Ag. Разрядная ёмкость немного возрастает в течение первых 50 циклов с ≈ 12 до $13 \text{ мА} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$ при 0,8 А/г. После первого цикла зарядки-разрядки, который включает первоначальное окисление и потерю ёмкости, эффективность быстро стабилизируется на уровне выше 95%, что указывает на хорошую цикличность материала. Окончательная конструкция съедобной батареи включает композиты RF/АС и Q/АС в качестве анода и катода соответственно. Полные испытания батареи проводились путём погружения двух электродов в электролит, водный раствор NaHSO_4 на глубину 1 метр внутри пластикового контейнера. Анод был загружен 0,75 мг RF/АС, а катод – 0,6 мг Q/АС. Разница в нагрузке анода и катода нужна, чтобы сбалансировать высокую первую зарядную ёмкость Q/АС по сравнению с RF/АС. Молекулы съедобного (биоразлагаемого) материала термодинамически реагируют, выделяя энергию в виде тепла. Поэтому во

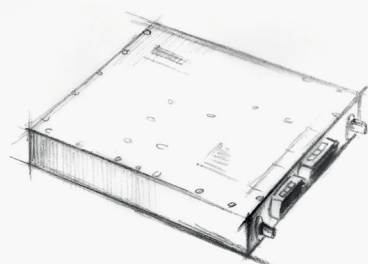
время зарядки Q подвергался окислению, а RF восстанавливался. Иллюстрация теста батареи с композитом Q/АС в качестве катода и композитом RF/АС в качестве анода представлена на рис. 9 (циклическая ВАХ заряженной батареи при различных скоростях сканирования). ВАХ батареи показывает окислительно-восстановительную активность в значении около 0,7 В по сравнению с RF. Как анод, так и катод испытываемой батареи показали хорошую пропускную способность, о чём свидетельствует снижение разрядной ёмкости полной батареи с 22 до всего лишь $18 \text{ мА} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$, тогда как скорость зарядки увеличилась с 0,1 до 0,8 А/г.

Обоснование ограничения потенциала

Даже при том, что полученное напряжение 0,6–0,8 В может показаться низким по сравнению с типичными малоомощными АКБ промышленного изготовления (2,7–3,7 В), низкие напряжения подходят для обеспечения питания устройств медицинской микроэлектроники с крайне малым энергопотреблением. Тем не менее, имея перспективы, разработчики пока

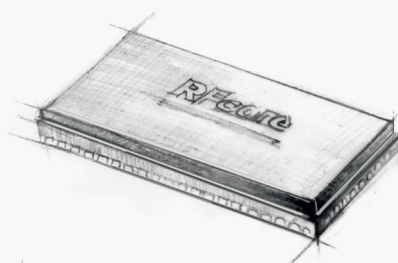


НОВЫЕ МОЩНОСТИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



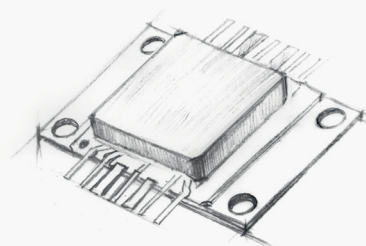
СВЧ-усилители мощности

- Диапазон частот: от HF до Ku
- Выходная мощность: 2...1000 Вт
- Типовое усиление: 25...65 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 40 В



Многофункциональные CMOS MMIC

- Диапазон частот: S, C, X, Ku
- Выходная мощность: до 15 Вт
- Исполнение: QFN-корпус



GaN и GaAs MMIC

- Диапазон частот: 2...18 ГГц
- Выходная мощность: до 12 Вт
- Типовое усиление: 10...23 дБ
- Исполнение: QFN-корпус/кристалл

ProCHIP
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 • INFO@PROCHIP.RU • WWW.PROCHIP.RU



не торопятся создавать более мощные элементы питания, и вот почему. Установлено, что при напряжении (в условиях среды) ниже 1,23 В не возникает эффект электролиза, в то время как при нахождении в кишечнике человека элемента с напряжением выше этого значения неизбежно возникает дополнительная химическая реакция, связываемая с электролизом, безотносительно того, является «элемент питания» биоразлагаемым или нет. С этим знанием также связана проблематика последствий проглатывания малолетними детьми элементов питания разной формы, в частности, маленьких дисковых батареек для часов (и др.), – к примеру, дисковые (плоские) элементы типа CR2016 и более мощные имеют напряжение 3 В.

Особенности зарядного тока

Энергетический потенциал, обеспечиваемый батареей на основе Li-ion, должен быть достаточно стабильным, а разрядка при критично низком потенциале или зарядка при слишком высоком потенциале могут необратимо повредить аккумулятор. В начальном цикле зарядки предварительно полностью разряженного аккумулятора его ёмкость примерно в 3 раза выше ёмкости в последующих циклах. Батарею испытывали в 50 циклах заряда и разряда, при этом получили данные о неравномерном убывании энергоёмкости. Так, разрядная ёмкость увеличивается в течение первых 8 циклов до $7,2 \text{ мА} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$ и падает до $5,4 \text{ мА} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$ после 50 циклов. Вероятная причина – из-за растворения молекул и заряженных частиц.

Чтобы сделать гальванический элемент безопасным и биоразлагаемым, активные (основные) материалы нанесены на ламинированную золотом этилцеллюлозу, которая служит токоёмником, как и в случае с полностью заряженной батареей. Количество загрузки составляло 1,5 мг для композита RF/AC и 1,2 мг для композита Q/AC, распределённого на площади 1 см^2 . Оболочку аккумулятора создали из пчелиного воска, а в качестве сепаратора использовались водоросли нори. При следующих экспериментах водный раствор электролита NaHSO_4 не меняли, но использовали в меньшем количестве ($\approx 300 \text{ мкл}$). Водоросли нори замачивали в электролите и помещали на токоёмники с предварительно нанесённым небольшим количеством электролита [9].

Ячейка была протестирована при гальваностатической зарядке-разрядке при токе 240 мкА при циклическом напряжении от 0,6 до 0,8 В (см. рис. 10 вверху). Разрядная ёмкость первоначально возрастает в течение первых 50 циклов с 6,3 до $7,0 \text{ мА} \cdot \text{ч}^{-1}$, а затем остаётся постоянной. Это можно объяснить смачиванием электрода, поскольку электролит достигает большей площади поверхности электрода инертно. Для зарядки и разрядки элемента требуется ≈ 2 минуты. Тот же эксперимент был проведён при более низком токе, 48 мкА, что привело к более высокой разрядной ёмкости, $\approx 10 \text{ мА} \cdot \text{ч}^{-1}$ (рис. 10 внизу). В этом случае установлено незначительное падение энергоёмкости с 10,1 до $9,1 \text{ мА} \cdot \text{ч}^{-1}$ после 18 циклов заряда-разряда. Профиль кривой зарядки-разрядки аналогичен показанному ранее: для полной зарядки требуется около 13 минут, а для полной разрядки примерно 12 минут (рис. 10).

В итоге при последовательном подключении двух рассмотренных батарей исследователи добились свечения светодиода HLMPK150 фирмы Broadcom. После предварительной и полной зарядки батарей светодиод был активен с плавным снижением яркости свечения в течение 12 минут (см. иллюстрацию рис. 7). Опыт наглядно доказал практическую возможность применения «съедобных» батарей в качестве источника питания с током от 0,2 мА. Составляя последовательно-параллельно подобные источники тока, можно добиваться существенного увеличения мощности АКБ СЭС.

Для других перспективных направлений исследований обратим внимание на естественные источники тока из овощей и фруктов. Это также направление совершенствования разработок в области безопасных для человека и животного биоразлагаемых материалов.

Маломощные биоразлагаемые батареи могут питать электронные устройства сверхмалой мощности. В эксперименте показаны светодиоды, питаемые током 10 мА. Этого тока и напряжения уже сегодня вполне достаточно, чтобы обеспечить электропитанием микроэлектронные модули современной медицинской электроники. Перспективы применения такой инновации в здравоохранении бесконечны, а с учётом совершенствования технологии и увеличения мощности

источника питания – способны проорывным образом двигать НТ прогресс.

Источники питания из овощей и фруктов

Обыкновенный картофельный клубень можно использовать в качестве источника питания малой мощности. Оказывается, в сырой картошке (более интенсивно, чем в сухой) постоянно происходят химические процессы. Процессы взаимодействия неодинаково сильны в клубне, положенном на свет (в том числе естественный), и картофелине, упрятанной в погреб. Несколько проведённых автором экспериментов с картофельными клубнями нового урожая привели к тому, что удалось зафиксировать между различными частями (концами) картофелины электрический ток малой силы (рис. 11). Сначала взята одна картофелина, к которой подключён в режиме измерения постоянного напряжения популярный цифровой тестер M-830. Предел измерения постоянного напряжения установлен 200 мВ. Показания вольтметра 19,1 мВ. При подключении 2 клубней в последовательную электрическую цепь напряжение, зафиксированное вольтметром постоянного тока, составило уже 135,3 мВ. Учитывая, что вольтметр имеет определённое внутреннее сопротивление (шунтирует проверяемую цепь), а отдаваемый ток ничтожно мал (порядка 5 мкА), естественно, значение фиксируемого напряжения на щупах вольтметра (разных концах картошки) со временем падает, и корректнее его измерять не бытовым, а лабораторным милливольтметром [3].

Так, во втором эксперименте с двумя картофелинами напряжение в электрической цепи упало за 1 мин со 141 мВ до 119,5 мВ. Это позволяет сделать вывод, что использовать картофель для питания электронных конструкций (даже самых маломощных) вряд ли целесообразно. Простые подсчёты (основанные на законе Ома) показывают, что для получения в произвольном источнике питания напряжения 13,5 В и тока 10 мА потребуется не менее 220 картофелин, включённых параллельно (для увеличения выходного тока) и последовательно (для увеличения выходного напряжения). Эксперимент, проведённый автором, показал, что выходное напряжение зависит также и от размера клубня, мест и глубины внедрения щупов, дли-

ны соединительных проводников и от состояния картофеля (влажность, «старость» клубня – состояние, освещение).

Если в качестве электродов применить однородный материал, тогда полярность нетрадиционного источника питания находят опытным путём. Если несколько клубней соединить в последовательную электрическую цепь, получится электрическая батарея, которая может давать напряжение и 5, и 10, и 20 В – проверено авторскими (и не только) экспериментами. Род тока постоянный, а сила тока в цепи условно мала – всего несколько миллиампер. Однако с учётом современных разработок (в том числе в сфере медицинской электроники) датчиков и РЭА с крайне малым энергопотреблением рассматриваемые источники тока вполне применимы. Они дополняют уже известные способы и технологии, связанные с уже известными возобновляемыми источниками энергии из естественной среды – энергии ветра, солнца, воды (гидрогенераторы) и даже компоста (биогенераторы) и др. Подробнее об этом в [4].

Если подключить несколько клубней последовательно-параллельно (при

параллельном включении источников ток в цепи увеличивается), от 4–5 средних размеров картофеля можно питать светодиод, а от 20–30 – заряжать аккумулятор миниатюрного сотового телефона условно небольшой ёмкости – до 100 мА. В сравнении с известными и популярными multifunctional смартфонами, АКБ которых обладают ёмкостью в несколько ампер, рассматриваемый пример кажется «детским и пионерским», однако нет пределов совершенству инженерной мысли: если уже можно получить ток в несколько мА, наступит время, когда технология усовершенствуется до необходимого усиления тока и до десятков ампер, а возможно, и больше. «И Рим не сразу строился»... Кто знает, не доживём ли мы до того, что энергия земли в сочетании с фотосинтезом будет естественным образом применяться как источник энергии почти в любом месте: «втыкаете два проводника в землю и заряжаете средство связи». Как бы фантастически не выглядели теперь эти мысли, они представляются реальными в будущем, вопрос только в конкретной форме их реализации.

Что до настоящего времени, то несколько лет назад выпускался и был популярен миниатюрный и сверхплоский сотовый телефон Elari (рис. 12) с АКБ ёмкостью 100 мА·ч. К слову, сей сотовый телефон автором был протестирован разносторонне, и он действительно работал до очередной подзарядки в течение одних суток при средней активности звонков и СМС.

Практическое применение

Рассмотренный выше нетрадиционный источник питания (состоящий из нескольких картофельных клубней) может применяться для питания детекторного приёмника с высокоомным телефоном, на это «сил» хватит. Другой, более специфичный вариант применения – короткий импульс малого напряжения для запуска электронных конструкций, реализованных с входными цепями по МОП-технологии.

Особенности сохранения потенциала

Экспериментально установлено, что постепенно напряжение на «вкусных» батарейках уменьшается. Лучше все-



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ЭЛЕКОНД

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	3,2 ... 485
Номинальная ёмкость, $C_{ном}$, мкФ,	1,0 ... 470 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С	-60 ... 125

Объёмно-пористые танталовые конденсаторы K52-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	3,2 ... 200
Номинальная ёмкость, $C_{ном}$, мкФ,	1,5 ... 60 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С	-60 ... 175

Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	2,5 ... 63
Номинальная ёмкость, $C_{ном}$, мкФ,	0,033 ... 2 200
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С	-60 ... 175

Суперконденсаторы K58-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	2,5 ... 2,7
Номинальная ёмкость, $C_{ном}$, Ф,	1,0 ... 4 700
Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{ср}$, °С	-60 ... 65

Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	5,0 ... 48
Номинальная ёмкость, $C_{ном}$, Ф,	0,08 ... 783
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С	-60 ... 65



Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53
e-mail: elecond-market@elcudm.ru, www.elecond.ru



Реклама



Рис. 12. Сотовый телефон Elari с АКБ энергоёмкостью 100 мА·ч

го потенциал сохраняет варёный картофель, но по энергоёмкости варёный картофель уступает свежему при прочих равных условиях форм-фактора, влажности, окружающей температуры и расстояния между электродами, погружёнными в овощ. На большую величину напряжение уменьшилось у яблока и лука из-за химического состава (чем больше сахара – тем хуже), а также из-за того, что сравнительно быстро происходит процесс окисления фрукта после повреждения кожуры – доступа воздуха. В этом смысле уместно сделать и такие выводы, что наиболее энергоёмкими являются естественные «электрические батареи», сделанные посредством соединения овощей и фруктов со следующими условиями, особенностями и составами:

- минимальное содержание сахара (свёкла даёт меньше энергии, чем картофель, а брюква – больше);
- минимальное наличие жидкости и «жидкой массы», консистенции внутри овоща (солёный огурец даёт меньше электроэнергии, чем свежий);
- максимальная твёрдость овоща и плотность кожуры (мягкий «полежалый» картофель даёт меньше энергии, чем плотный, твёрдый, более свежий);
- энергетическая эффективность и потенциальная польза для РЭА естественного биоразлагаемого источника энергии зависит от многих факторов, таких как состояние овоща, его химический состав, состояние среды, мест погружения и расстояния между электродами для съёма-измерения разницы потенциалов и др.

Есть и другие выявленные знания законов гальванофизики, химии и эмпирическим способом замечательные особенности и перспективы применения овощей и фруктов в качестве безопасных и биоразла-



Рис. 13. Сведения о разных значениях выявленного напряжения и естественных биоразлагаемых источниках тока

Таблица 1. Сведения сохранения электрического потенциала в нескольких разных источниках – овощах и фруктах

Основа естественного источника тока	Напряжение, В		
	Через 1 день	Через 5 дней	Через 10 дней
Лимон	0,6	0,14	0,08
Лук	0,7	0,1	0,08
Яблоко	0,6	0,08	0,06
Картофель	0,6	0,2	0,1
Варёный картофель	0,6	0,6	0,4

гаемых источников электрического тока, но если приводить их все – так мы никогда не закончим. На рис. 13 (график) представлены сведения о разных значениях выявленного напряжения и естественных биоразлагаемых источниках тока. В табл. 1 даны сведения сохранения электрического потенциала в нескольких разных источниках – овощах и фруктах [3].

В естественных источниках тока постоянно протекают электрохимические процессы, все они до конца не изучены, или, по крайней мере, результаты исследований и выводы по ним досконально не обобщены – это дело будущего.

Выводы и перспективы

Разработка перезаряжаемых АКБ как элементов СЭС имеет важное значение для экологии и «зелёной» электроники, поскольку позволяет использовать АКБ повторно, к примеру, для мониторинга качества пищевых продуктов, так сокращается количество отходов. Полностью биоразлагаемую, а потому безопасную и съедобную аккумуляторную

батарейку вполне можно использовать для питания таких же биоразлагаемых датчиков, вводимых в организм человека и животного с целями медицинских и иных исследований. Таким образом, открыт путь к совершенствованию разработок в области «съедобной электроники». Потенциально масштабируемая «съедобная батарея», имеющая анод и катод, инкапсулированные в съедобный пчелиный воск, позволяет генерировать ток 48 мкА в течение 12 минут при использовании элемента с активной площадью 1 см². Но даже этот размер (формат) считается громоздким, поэтому в будущем размер АКБ СЭС будут стремиться сокращать. Свойства гибкости электродов стремятся использовать для дальнейшего уменьшения объёма батареи при заданной ёмкости, что позволяет поместить батарею в таблетку или другие легко проглатываемые контейнеры-формы. Уже сегодня разработчики заняты поиском более тонких и гибких материалов для «съедобных корпусов-оболочек» на примере гибких и тонких плёнок, биоразлагаемых мелких пакетов. В поиске матери-

алов для биоразлагаемых источников тока сегодня используют электролиты с содержанием воды. В этой среде удобно испытывать АКБ СЭС, поскольку вода является основой природных окислительно-восстановительных систем. В частности, речь о перспективах разработки окислительно-восстановительных чернил для печати, что даёт перспективы производства съедобных и безопасных чернил.

АКБ как элемент СЭС в связи с современной электроникой даёт импульс развитию огромному количеству приложений в здравоохранении, фармакологии и гастрономической сфере, ускоряя переход от биоразлагаемых, безотходных к «полностью съедобным» технологиям и устройствам. В среднесрочной перспективе новые технологии биоразлагаемых АКБ заменят токсичные аккумуляторы (проблема проглатывания), которые в настоящее время используются в портативных электронных устройствах. Рассмотренные выше АКБ – элементы СЭС уже на текущем этапе показали потенциал развития в сравнении с ранее разработанными «съедобными суперконденсаторами» и съедобными топливными элементами и представляют многократно перезаряжаемое устройство. Также мы показали возможности по извлечению электроэнергии из обычных овощей и фруктов.

Пищевая электроника – новая область с большими перспективами и связями с медицинской микроэлектроникой для обследования, качественной диагностики и терапии не только заболеваний желудочно-кишечного тракта. Следовательно, все работы в означенной области направлены на решение важнейшей проблемы человечества – продления жизни и сохранения здоровья людей и животных.

Литература

1. Аккумуляторная батарея, сделанная из еды (A rechargeable battery made from food). URL: <https://opentalk.iit.it/en/a-rechargeable-battery-made-from-food/>.
2. Камалетдинова К.Ф. Электрический ток в овощах и фруктах. URL: <https://infourok.ru/issledovatelskaya-rabota-elektricheskij-tok-v-ovoshah-i-frukтах-6232804.html>.
3. Кашкаров А.П. Электронные опыты для юного радиолюбителя. Ростов н/Д: Феникс, 2013. 160 с.
4. Кашкаров А.П. Отходы – в доходы: правила и проекты безубыточного хозяйствования. М.: ДМК-Пресс, 2012. 152 с.
5. Электронный самоликвидирующийся стимулятор восстановления повреждённых тканей на основе PLGA. Опыт США и России. URL: <https://www.cta.ru/articles/>

- soel/2023/2023-7/169731/?sphrase_id=394749.
6. Biologically derived melanin electrodes in aqueous sodium-ion energy storage devices. URL: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000328858800029?SID=EUW1ED0D02H45z6uZfnNkYRQgF8w1>.
 7. Jeerapan I., Ciui B., Martin I., Cristea C., Sandulescu R., Wang J., Mater J. Chem. B 2018, 6, 3571. URL: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000434242500015?SID=EUW1ED0D02H45z6uZfnNkYRQgF8w1>.
 8. Wang X., Xu W., Chatterjee P., Lv C., Popovich J., Song Z., Dai L., Kalani M.Y.S., Haydel S.E., Jiang H. Food-Materials-Based Edible Supercapacitors. Adv. Mater. Technol. 2016, 1, 1600059. URL: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000398995500006?SID=EUW1ED0D02H45z6uZfnNkYRQgF8w1>.
 9. Ilic Ivan K. An Edible Rechargeable Battery. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202211400>.
 10. Pengzhou Li, Zhe Yang, Chuanfa Li, Jiaxin Li, Chuang Wang, Jiawei Chen, Sijia Yu, Yanan Zhang, Yi Jiang, Yue Gao, Bingjie Wang, Huisheng Peng. Swimmable Micro-Battery for Targeted Power Delivery, Advanced Functional Materials, 10.1002/adfm.202312188, 34, 9, (2023).



НОВОСТИ МИРА

В России создадут первый отечественный станок для нарезания заготовок из кремниевых пластин

Как пишут Ведомости, Минпромторг объявил конкурс на разработку опытного образца станка для нарезания заготовок из кремниевых пластин – первого этапа в технологическом процессе изготовления микропроцессоров и электронной компонентной базы.

Станок, пока не имеющий конкурентов в России, должен стать функциональным аналогом продукции сразу трёх иностранных компаний. В списке упомянуты Meyer Burger, Linton Kayex и Diamond Wire Technologies.

Станок, разработку которого заказал российский Минпромторг, предназначен, как пишут «Ведомости», для «отсечения конусов и нарезания заготовок из кремниевых и германиевых стержней диаметром не более 300 мм и заготовок из синтетического сапфира, кварца, арсенида галлия, карбида кремния диаметром не более 150 мм».

«Данный тип оборудования является ба-

зовым в технологической цепочке производства, – говорится в техзадании к тендеру Минпромторга. – Вследствие возникающей необходимости технического перевооружения существующих в России производств, а также развития импортонезависимой отечественной силовой электроники существует значительная потребность в данном оборудовании».

russianelectronics.ru

Китай пригрозил Японии жёстким ответом в случае ограничений поставок оборудования для чипов по требованию США

КНР пригрозила Японии жёсткими ответными санкциями в случае ограничений поставок оборудования для чипов по требованию США, пишет в понедельник агентство Bloomberg.



В июне сообщалось, что Вашингтон добивается от Нидерландов и Японии введения новых ограничений на поставки в КНР оборудования для производства передовых чипов.

Япония, по данным источников Bloomberg, пока не решает на дополнительные ограничения, поскольку опасается, что Китай в таком случае заблокирует ей поставки сырьевых товаров, без которых не сможет обойтись автомобильная промышленность страны, в частности, компания Toyota.

Напомним, введённые ранее ограничения Китая на экспорт галлия и германия ударили по цепочке поставок полупроводниковой продукции Запада, а также привели к значительному росту цен.

Отметим, в августе президент России поручил снизить налоги на средства производства в радиоэлектронной промышленности.

По данным отраслевой организации SEMI, Россия не входит в пятёрку рынков оборудования для полупроводников. В лидерах Китай, Корея, Тайвань, ЕС и Северная Америка.

industry-hunter.com