

## О Т З Ы В

научного руководителя о диссертационной работе  
Федорова Ивана Сергеевича

**Разработка основ технологии формирования электродов тонкопленочного литий-ионного аккумулятора методом магнетронного распыления**  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности

05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах  
(физико-математические науки)

Диссертационная работа И.С. Федорова посвящена решению актуальной проблемы в области миниатюрных химических источников тока – разработке физических основ технологии изготовления тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов в интегральном исполнении и на основе оксидов ванадия и кремния.

Важной областью применения литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) является электроника, для которой необходимы миниатюрные и высокоемкие аккумуляторы. Миниатюризация ЛИА предполагает переход на твердотельные аккумуляторы, которые найдут применение в устройствах микроэлектроники, гибкой электроники, смарт-картах, МЭМС устройствах и приборах одноэлектроники. По интегральной технологии могут изготавливаться как миниатюрные, так и крупногабаритные аккумуляторы, например, для автономных источников энергии. Переход на интегральные ЛИА позволит создать новые, экологически чистые аккумуляторные производства, которые смогут работать по «сухой» технологии.

В настоящее время наиболее остро стоит проблема разработки и производства полностью твердотельных ЛИА. Для ряда устройств интегральной электроники требуются аккумуляторы в интегральном исполнении, размещенные на том же кристалле или подложке, что и само устройство. В этом случае замещение микроаккумулятора импортным источником тока физически невозможно. Таким образом, возникает задача разработки интегральной технологии изготовления ЛИА, причем для ряда устройств она должна быть

совместимой с СБИС-технологией. Таким образом, работа И.С. Федорова является своевременной, а тема исследования – актуальной.

В диссертационном исследовании И.С. Федорова представлены результаты разработки физических основ технологии формирования тонкопленочного (толщиной 2 - 4 мкм) пористого нанокompозита на основе оксидов ванадия и кремния методом магнетронного распыления. В работе исследовано влияния параметров распыления и последующих технологических операций на морфологию, элементный состав, фазовый состав, проводимость и емкостные характеристики пленок. Все экспериментальные результаты, полученные с использованием стандартных методов анализа, таких как: сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, рентгеноструктурный анализ, рентгенофазовый анализ, спектроскопия комбинационного рассеяния, импедансометрия, гальваностатическое циклирование, циклическая вольтамперометрия, являются научно обоснованными и достоверными.

И.С. Федоровым самостоятельно выполнены работы по исследованию фазового состава более 60-и экспериментальных образца электродов  $V_xO_y$  и Si-O-Al методом рентгеновской дифрактометрии, включая расшифровку дифрактограмм и идентификацию фаз оксидов ванадия. Им разработана методика определения соотношения аморфной и кристаллической фаз оксидов ванадия. Исследованы закономерности изменения фазового состава пленок  $V_xO_y$  при изменении технологических параметров напыления (структура поверхности подложки, мощность магнетрона, давление и расход аргонокислородной смеси, время напыления) и кислородного отжига (давление кислорода, температура, время отжига). Проанализировано влияние этих параметров на морфологию и элементный состав пленок и выработаны рекомендации по выбору оптимальных технологических параметров.

Соискателем самостоятельно выполнены измерения зарядно-разрядных характеристик экспериментальных образцов положительных электродов на автоматизированном зарядно-разрядном измерительно-вычислительном комплексе АЗРИВК1-0,05А-5В и многоканальном потенциостате Р-20Х8. Им

проведены измерения зарядно-разрядных характеристик нескольких десятков экспериментальных образцов положительных электродов, определены их удельные емкости и установлена взаимосвязь морфологии и фазового состава пленок с их емкостными характеристиками и стабильностью.

Методом рентгенофазового анализа И.С. Федоровым исследованы пленки  $V_xO_y$  после 1000 циклов заряд-разряд и установлена степень деградации «рабочих» фаз оксида ванадия. На основании полученных данных внесены коррективы в режимы нанесения и отжига пленок  $V_xO_y$  с целью повышения содержания наиболее емкой, стабильной и проводящей фазы  $V_3O_7$ .

Ряд представленных в работе результатов получен в рамках работ по Соглашению о предоставлении Субсидии № 14.574.21.0099 от «26» августа 2014 г. по теме «Разработка научно-технических решений по созданию тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов на основе нанокompозитов кремния и высших оксидов ванадия, обладающих повышенной удельной емкостью и скоростью зарядки».

Работа над диссертацией потребовала от И.С. Федорова определенных навыков в проведении экспериментальных исследований методами рентгенофазового анализа, циклической вольтамперометрии и импедансометрии. С поставленной задачей И.С. Федоров успешно справился, продемонстрировав хорошую базовую подготовку и опыт работы с научной периодикой и другими информационными источниками. Им самостоятельно проработан большой объем литературы по пленкам оксидов ванадия и нанокompозитов кремния для литий-ионных аккумуляторов.

За время обучения в аспирантуре И.С. Федоров активно участвовал в образовательной деятельности базовой кафедры нанотехнологий в электронике, проводя занятия с магистрантами по методам рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа. По итогам конкурсного отбора И.С. Федоров признан победителем программы УМНИК Фонда содействия инновациям.

При работе над диссертацией И.С. Федоров продемонстрировал развитые аналитические способности, высокую работоспособность, творческий склад личности и склонность к исследовательской деятельности. В целом, диссертационная работа И.С. Федорова является самостоятельным, оригинальным исследованием, отвечающим требованиям «Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней». Считаю, что Федоров Иван Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах (по физико-математическим наукам).

Научный руководитель –  
Директор Ярославского филиала  
ФТИА РАН, заведующий базовой  
кафедрой нанотехнологий в электро-  
нике, д.ф-м.н., профессор

Рудый А.С.

