

УДК 621.382.822.23.002:66

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

В.А. СОКОЛ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 10 декабря 2003

Приведены результаты работ по созданию электрохимической технологии микро- и наноэлектронных устройств, в основном гибридных интегральных микросхем и многокристальных модулей. Рассмотрены технологии алюминиевых оснований, многоуровневых систем межсоединений и алюминиевых корпусов для ГИС и СБИС. Представлены результаты работ по созданию электрохимической технологии изготовления наноэлектронных устройств, таких, как матричные управляемые автоэмиссионные катоды и транзисторы, работающие на основе квантового эффекта одноэлектронного переноса.

Ключевые слова: анодирование, алюминий, пористый оксид алюминия, наноэлектронные устройства.

Введение

Интенсивно возрастающие требования к функциональной сложности радиоэлектронных устройств, улучшение или сохранение их массогабаритных характеристик и надежности вызывает необходимость постоянного поиска новых, эффективных конструктивно-технологических решений. В БГУИР (МРТИ) начиная с 1975 г. сформулировано и развивается направление – электрохимическая технология микро- и наноэлектронных устройств, в основном гибридных интегральных микросхем и многокристальных модулей [1, 2]. В работе приводятся основные результаты исследований, выполненных в рамках этого направления к настоящему времени.

Алюминиевые основания

Главным конструктивным, несущим элементом любого микроэлектронного устройства является основание, на котором монтируются все функциональные элементы. Это классические печатные платы, диэлектрические (ситалл, керамика, поликор, полиимид, стекло) и металлические (сталь, медь, алюминий, титан и др.) основания гибридных интегральных микросхем и многокристальных модулей. В БГУИР разработана и продолжает совершенствоваться электрохимическая технология создания алюминиевых оснований [3]. Выбор алюминия связан прежде всего с тем, что он является единственным металлом, на котором методом анодирования можно вырастить высококачественный диэлектрический слой оксида алюминия толщиной до нескольких сотен микрон. В общем процесс изготовления алюминиевых оснований включает в себя подготовку поверхности алюминиевых пластин до уровня 13-14-го класса поверхности, анодирование в водных растворах серной, щавелевой, фосфорной и других кислот, в которых оксид алюминия частично растворяется. Процесс анодирования позволяет получить на поверхности алюминиевой пластины пористый оксид алюминия толщиной от долей до сотен микрон. Далее

поры оксида различными способами заполняются диэлектрическим материалом. Такой оксид в зависимости от режимов формирования имеет значение диэлектрической постоянной в пределах 4 - 9 и пробивное напряжение при толщине оксида 200 мкм составляет 5 - 10 кВ.

Основания могут быть использованы для изготовления гибридных микросхем и многокристалльных модулей по любой из известных тонкопленочных и толстопленочных технологий с низкой (200 - 300°C) температурой вжигания паст. Такие изделия обладают повышенной удельной рассеиваемой мощностью и механической прочностью. В оксиде могут быть сформированы контактные переходы на алюминиевую основу для разводки питания схемы и локальные места для установки, например, мощных активных элементов или СБИС [4]. Применение таких оснований весьма перспективно в устройствах СВЧ. Дело в том, что с увеличением рабочей частоты толщина диэлектрического основания должна уменьшаться и в диапазоне выше 50 ГГц она составляет 200 - 300 мкм. Изготовить такие основания в принципе возможно, однако они дорогие и их площадь из-за низкой механической прочности весьма ограничена. Дальнейшее увеличение частоты еще больше усугубляет ситуацию. Еще в 1979 г. на Всемирной конференции по радиочастотам был утвержден план использования миллиметрового диапазона волн выше 40 ГГц, который предусматривал широкое развитие техники крайне высоких частот (30 - 300 ГГц) и гипервысоких частот (300 - 3000 ГГц). В связи с этим применение алюминиевых оснований с указанным выше диапазоном толщин диэлектрического слоя сейчас рассматривается как единственный, готовый к использованию вариант [5].

Многоуровневая система межсоединений

Для дальнейшего развития этих работ в БГУИР разработана и продолжает совершенствоваться электрохимическая технология создания многоуровневой системы межсоединений (МСМ). Ее аналогом послужила технология создания планарной системы *одноуровневых* межсоединений, которая появилась в 1971 г. [6]. Она заключается в том, что на поверхность диэлектрического основания напыляют пленку алюминия, проводят маскирование поверхности будущих дорожек и алюминий между дорожками электрохимическим анодированием превращают в оксид алюминия (Al_2O_3) в отличие от известных технологических решений, когда металл между проводящими дорожками вытравливается. Эта идея была развита в БГУИР [1,2] и к настоящему времени получены следующие результаты. Создана технология *многоуровневой* системы межсоединений [7,8], в которой решены вопросы планаризации каждого уровня, формирование межуровневых контактных переходов без использования процесса травления межуровневого диэлектрика и лужения алюминиевых монтажных площадок [9]. Она позволяет создавать МСМ с шириной дорожек металлизации и расстоянием между ними 5 мкм и более. Классическое количество планарных уровней - 5 (два сигнальных, две шины питания и один монтажный). Пробивные напряжения между дорожками металлизации на одном уровне и между уровнями составляют более 100 В. Толщина дорожек – до 5 мкм. Развитием этой технологии явилась разработка конструктивно-технологических методов создания МСМ со встроенными в ее объем пассивными тонкопленочными элементами, резисторами и конденсаторами [11]. Резисторы могут быть изготовлены на основе пленок Та и ТаAl и любых известных резистивных материалов, а конденсаторы – на основе оксидов вентильных металлов (Al, Ta, Nb, Ti). На рис. 1 показаны фотографии многокристалльных модулей с многоуровневой планарной системой межсоединений, изготовленных по разработанной технологии.

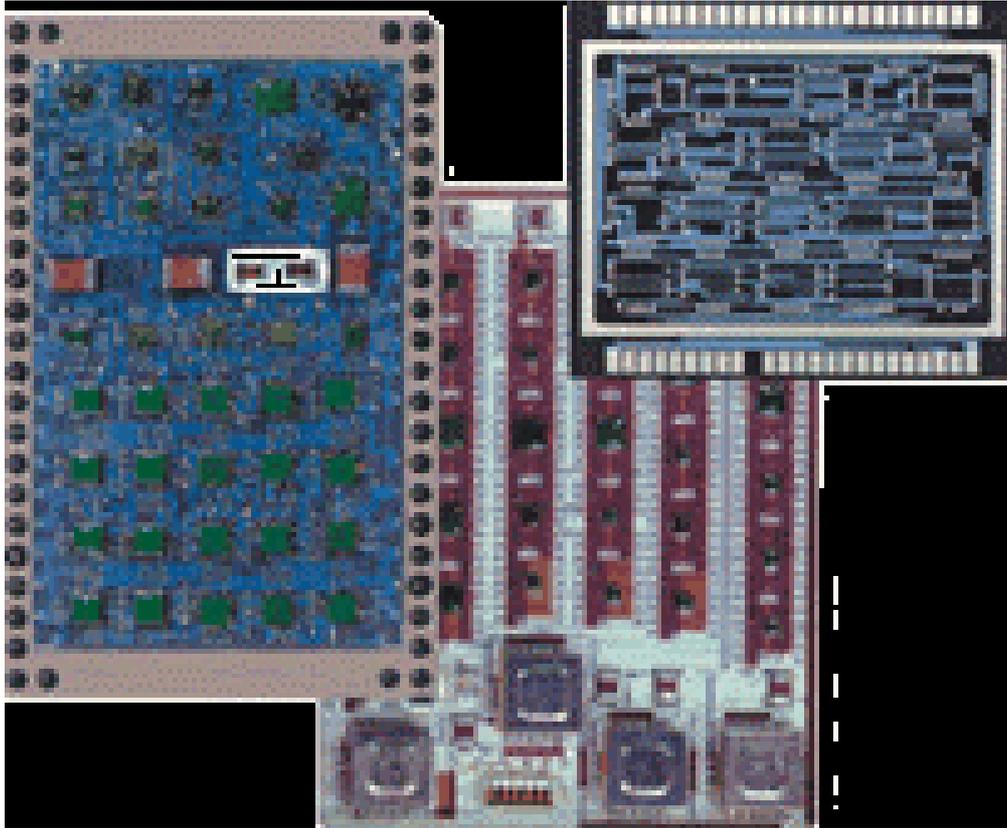


Рис. 1. Фотографии многокристальных модулей с многоуровневой планарной системой межсоединений, изготовленных по электрохимической технологии

Алюминиевая система межсоединений проигрывает по величине сопротивления медным межсоединениям и ее применение в ряде случаев ограничено. Поэтому был разработан технологический процесс планарной МСМ, в которой вместо алюминиевых дорожек формируются медные. Изоляция между дорожками металлизации и уровнями обеспечивается электрохимическим анодным оксидом алюминия. Последовательность базовых операций состоит из последовательного напыления пленки тантала и алюминия, полного сквозного (до тантала) превращения алюминия в пористый оксид методом анодирования, формирования на поверхности оксида маски в местах будущей изоляции между дорожками, травления оксида до тантала, электрохимического осаждения меди в вытравленные канавки до заполнения. Так получают первый планарный уровень медных межсоединений. Для формирования следующего уровня операции повторяют. Важно отметить, что в разработанной нами медной системе межсоединений планаризация впервые достигается за счет электрохимического осаждения и травления меди без применения в подобных системах весьма дорогостоящего процесса химико-механической полировки.

Алюминиевые корпуса

Использование основных принципов электрохимической технологии анодирования алюминия оказалось весьма эффективным и для создания корпусов гибридных и полупроводниковых микросхем [11]. На рис. 2 представлен вариант корпуса гибридной ИС с алюминиевой подложкой в качестве несущей конструкции. Такое конструктивно-технологическое решение дает возможность исключить металлостеклянный корпус, сократить число сборочных операций и в 2-3 раза улучшить характеристики микросборки.

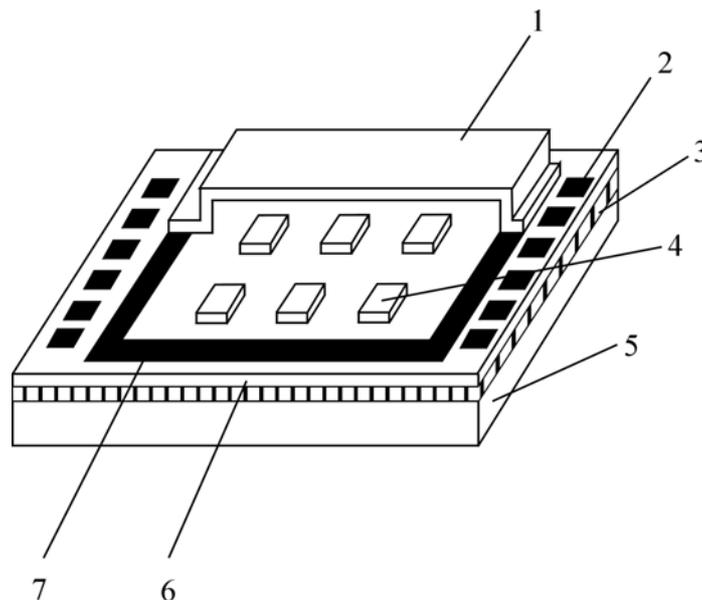


Рис. 2. Алюминиевый корпус гибридных интегральных схем: 1 — металлическая крышка, припаиваемая к ободку 7; 2 — контактные площадки внешних выводов; 3 — слой диэлектрика; 4 — кристаллы БИС; 5 — алюминиевое основание; 6 — двухуровневая система межсоединений; 7 — изолированный луженый металлический ободок

Электрохимическая технология позволяет изготавливать также алюминиевые кристаллоносители и корпуса для СБИС. Один из вариантов такого корпуса показан на рис. 3.

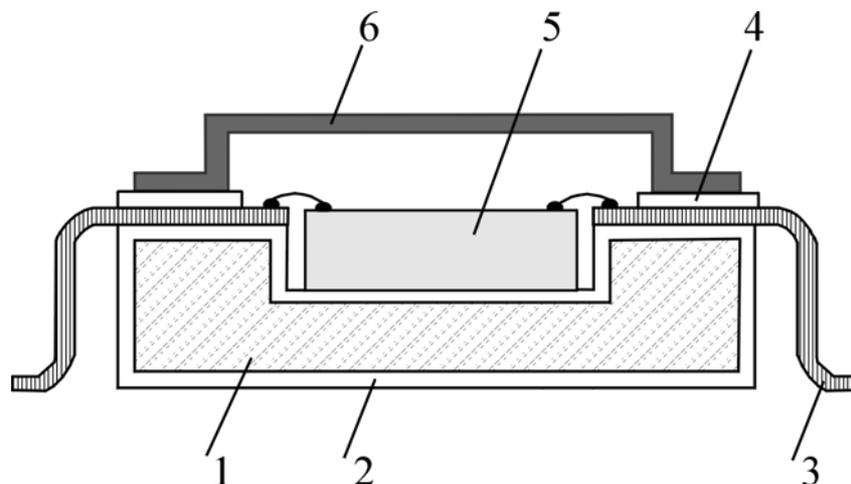


Рис. 3. Алюминиевый корпус СБИС

Методом химического травления или электроэрозионным способом в алюминиевой пластине заготовки 1 формируют углубление под кристалл СБИС. Проводят глубокое пористое анодирование для создания сплошного диэлектрического слоя 2. Методом фотолитографии и травления отдельно изготавливают выводную рамку 3, которую затем приклеивают к основанию корпуса и прижимают анодированной алюминиевой рамкой 4. В углубление устанавливают кристалл СБИС 5, производят соединение контактных площадок кристалла с гибкими выводами. Далее к алюминиевой рамке приклеивают крышку 6 корпуса. Вместо клеевого соединения крышки и выводов возможно использование стекла. На рис. 4 представлены фотографии алюминиевых корпусов, изготовленных по указанной технологии.

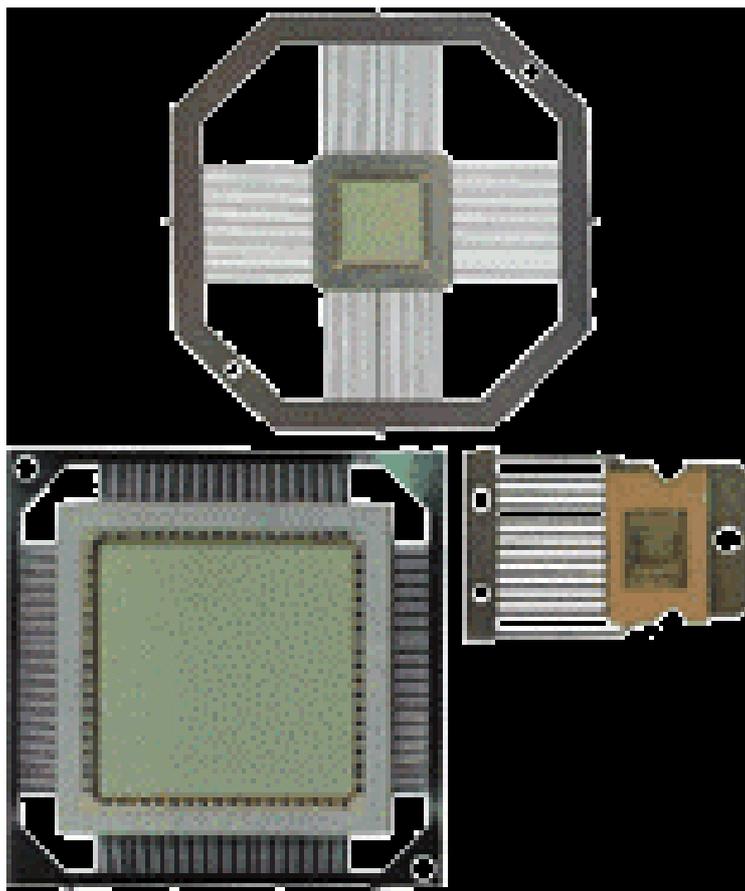


Рис. 4. Фотографии алюминиевых корпусов, изготовленных по электрохимической технологии

Управляемые матричные автоэмиссионные катоды на основе пористого оксида алюминия

Автоэмиссионные катоды (холодные эмиттеры) — это источники электронов, принцип работы которых основан на явлении автоэлектронной эмиссии, т. е. на туннелировании электронов под действием приложенного электрического поля через потенциальный барьер на границе раздела "твердое тело – вакуум". Вероятность такого туннелирования определяется высотой потенциального барьера (работой выхода) и величиной приложенного электрического поля. Для получения автоэмиссионного тока с поверхности катода требуется создать напряженность поля $10^7 - 10^8$ В/см. Для типичного значения работы выхода 4,5 эВ при этом достигается плотность тока $\sim 10^7$ А/см². Предельные значения плотности тока могут достигать 10^{10} А/см². Очевидно, что такие значительные поля невозможно создать из-за пробоя (даже в очень высоком вакууме), если область однородного поля будет превышать площадь, большую нескольких квадратных микрон. Именно поэтому автоэлектронная эмиссия реализуется только на катодах в форме острия или лезвия. Подобные катоды весьма привлекательны: они обладают очень большой плотностью тока, не требуют подогрева, практически безынерционны. Для применения устройств с автоэлектронной эмиссией в качестве элементов радиотехнических устройств весьма важно, что вольтамперная характеристика автокатодов сильно нелинейна.

Спектр применения автоэмиссионных катодов чрезвычайно широк: от приборов вакуумной электроники до эффективных источников света различного назначения. Но, пожалуй, самая перспективная область – плоские автоэмиссионные дисплеи для мониторов и телевизоров, не уступающие электронно-лучевым дисплеям по разрешению и яркости. Для таких применений необходимо формировать большие матрицы автоэмиссионных катодов. Для этих целей могут использоваться высокоупорядоченные нанопористые структуры анодного оксида алюминия, в котором поры заполнены металлом.

Алюминий высокой степени чистоты при обработке методом двухступенчатого анодирования образует высокоупорядоченные плотноупакованные матрицы нанопор в оксиде алюминия с диаметром пор от 1 до 200 нм и более, расстоянием между порами, равным двум их диаметрам, и высоким соотношением глубины пор к их диаметру от 1 до 10 000 и более. Для создания автоэмиссионных катодов такие матрицы заполняют металлом их электрохимической обработкой в растворах солей металлов [12]. Управляющий электрод (сетка) формируется в результате вакуумного напыления металла на поверхность стенок пор и позволяет управлять потоком электронов. Используя различные технологические приемы, над поверхностью катодов можно создать анод и получить фактически аналог электронной лампы, а формируя такие микролампы в локальных местах и соединяя их соответствующим образом, можно реализовать вакуумную БИС. На рис. 5 показаны микрофотографии полученных структур, выполненные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

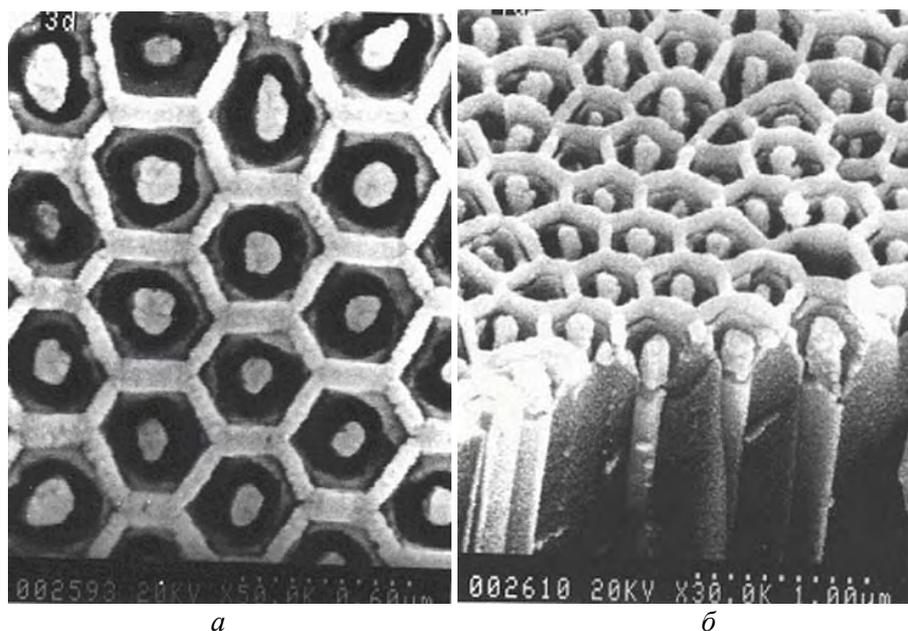


Рис. 5. Высокоупорядоченные матрицы пор в анодном диоксиде алюминия, заполненные никелем: *a* — вид сверху; *б* — поперечное сечение

Поперечное сечение матричных автоэмиссионных катодов с контрольным электродом схематически представлено на рис. 6.

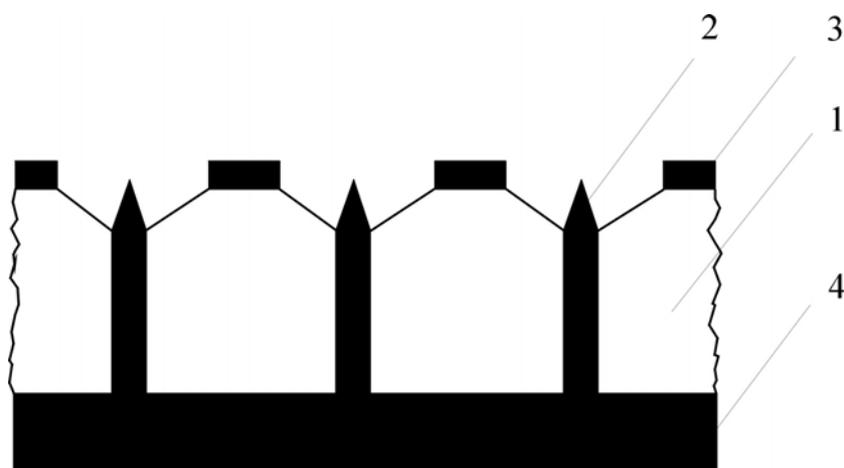


Рис. 6. Поперечное сечение матричных автоэмиссионных катодов с управляющим электродом: 1 – диэлектрическая матрица анодного оксида алюминия; 2 – металлические эмиттеры; 3 – управляющий электрод; 4 – металлическая подложка

Одноэлектронные транзисторы на основе анодного пористого оксида алюминия

Если между двумя проводниками создать очень малого размера слой изолятора (туннельный переход), то, согласно основным принципам квантовой механики, электроны могут переходить через изолятор с одного проводника на другой – "туннелировать". В отличие от обычного движения электронов в проводнике, которое зависит лишь от их коллективных свойств, при туннелировании проявляются индивидуальные характеристики каждой частицы. Электроны проходят через слой изолятора по отдельности и это позволяет зарегистрировать перемещение с проводника на проводник даже одного из них. Ведь с точки зрения радиоэлектроники туннельный переход – это простейший конденсатор, а туннелирование электронов приводит к небольшой перезарядке такого конденсатора и, следовательно, к изменению на нем напряжения. Если площадь и соответственно емкость перехода достаточно малы, то перезарядка даже на один элементарный заряд приведет к заметному скачку напряжения.

Управление единичным электроном было впервые продемонстрировано Милликемом еще в самом начале столетия, но в твердотельных схемах не осуществлялось до конца 80-х годов, несмотря на несколько ранних основополагающих работ [13-16]. Главной причиной этой задержки является то, что управление требует воспроизводимого формирования диэлектрических туннельных промежутков и их точного расположения по отношению к внешним электродам. Необходимые процессы нанотехнологии были разработаны только в последние два десятилетия, что привело к интенсивному развитию одноэлектроники, основанной на эффекте коррелированного одноэлектронного транспорта [17,18]. Теория описанных явлений создавалась усилиями многих ученых, но решающий вклад в нее внес московский физик К.К. Лихарев, который теоретически рассчитал, а потом экспериментально обнаружил эффект одноэлектронного туннелирования.

Предположим, что какой-то из электронов перешел сквозь изолятор незаряженного перехода. При этом на переходе сразу же появится напряжение, препятствующее движению следующих частиц, – проскочивший электрон своим зарядом отталкивает собратьев. Это явление было названо кулоновской блокадой. Из-за блокады очередной электрон пройдет через изолятор только тогда, когда предыдущий удалится от перехода. В результате частицы станут перескакивать с проводника на проводник через определенные промежутки времени, а частота таких перескоков, – одноэлектронных колебаний – будет равна величине тока, деленной на заряд электрона. Теперь представим, что удалось получить систему из двух последовательно соединенных переходов, nanoостровков металла, и туннельный слой изолятора, отделенный от подводящих к нему с двух сторон проводников. От заряда на островке будет зависеть проницаемость обоих переходов, значит, меняя этот заряд, нетрудно управлять током через систему. На таких устройствах (одноэлектронных транзисторах) можно построить почти любую схему – аналоговую или цифровую. Туннельный переход в указанной системе происходит $\sim 10^{12}$ раз в секунду. Это теоретически позволяет создавать микросхемы, работающие на частотах 100 - 1000 ГГц, но при этом они будут потреблять очень мало энергии (на несколько порядков меньше, чем современные полупроводниковые), несмотря на высокую плотность элементов. Последнее обстоятельство предотвратит угрозу сбоев в работе из-за перегрева, что является огромной проблемой для полупроводниковых схем.

Если за счет теплового движения частица приобрела достаточно большую энергию, она может прорвать кулоновскую блокаду. Поэтому для каждого одноэлектронного устройства существует своя критическая температура, выше которой она перестает работать. Эта температура обратно пропорциональна площади перехода: чем меньше его емкость, тем больше скачок напряжения и тем выше барьер кулоновской блокады.

Первый туннельный одноэлектронный транзистор, работающий при сверхнизких температурах, был построен в МГУ им. М.В. Ломоносова (одновременно это же сделали американцы). Однако сверхнизкие температуры вблизи нуля по шкале Кельвина неприемлемы при массовом производстве каких бы то ни было устройств. Гораздо больший интерес представляют транзисторы, функционирующие при комнатной температуре (около 20°C). Для этого требуется уменьшить размеры их функциональных элементов до нескольких нанометров.

Методы, используемые в области исследований (главным образом, сканирующая туннельная микроскопия), позволяют получить одноэлектронный транзистор требуемого размера. Однако такие методы практически невозможно применить в масштабах всей пластины или хотя бы на уровне отдельного чипа из-за их очень низкой скорости. Разработка процессов нанотехнологии на этой основе для производства СБИС (например, одновременное сканирование несколькими электронными пучками) определенно потребует многолетней работы и огромных финансовых затрат. Поэтому было даже высказано опасение, что потенциальные замечательные возможности ОЭТ никогда не будут реализованы из-за технологических и/или экономических ограничений [19].

Однако выход есть. Нами для создания многоостровковых одноэлектронных транзисторов, работающих при комнатной температуре, предложено использовать указанные выше самоорганизованные наноразмерные структуры пористого оксида алюминия, заполненные металлом. На рис. 7 показаны конструкции многоостровковых одноэлектронных транзисторов, изготавливаемых по указанной технологии.

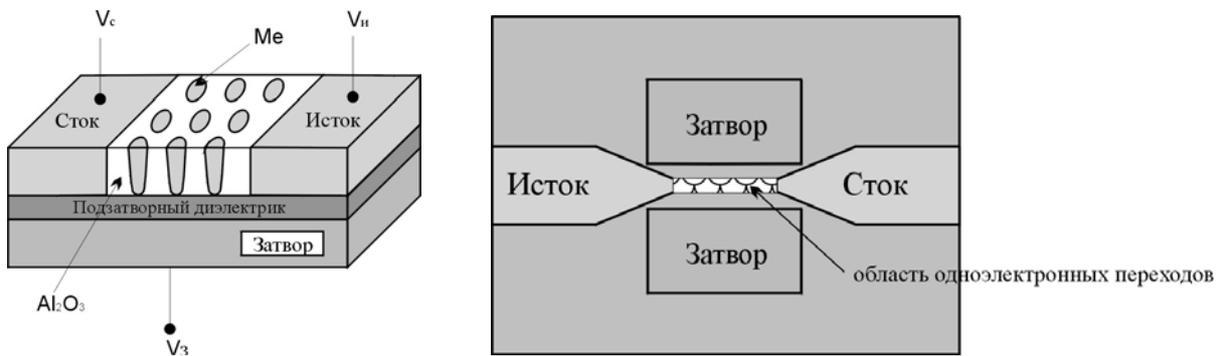


Рис. 7. Конструкции одноэлектронных транзисторов на основе самоорганизованных наноразмерных матриц пористого оксида алюминия, заполненных металлом

Как видно из рисунка, данная технология позволяет создавать различные конструкции одноэлектронных транзисторов, в которых управляющий электрод (затвор) будет располагаться в одной плоскости с электродами исток-сток или ниже исток-стоковых областей и формироваться до изготовления многоостровковых одноэлектронных матриц. Данным способом многоостровковые одноэлектронные транзисторы могут создаваться одновременно на всей пластине и даже на партии пластин групповым способом, как и традиционные полупроводниковые схемы. Традиционные методы фотолитографии, используемые в современной технологии микроэлектроники, могут быть использованы для формирования электродов затвора, истока и стока. Кроме того, предлагаемый метод хорошо совместим с технологией традиционной кремниевой микроэлектроники и подходит для интегрирования транзисторов в схему. При этом нет необходимости разрабатывать новые процессы технологии создания микросхем.

Следует отметить, что СБИС на основе одноэлектронных транзисторов, создаваемых предлагаемым способом, могут создаваться не только на кремниевом, но и практически на любом основании - диэлектрическом или металлическом. Все это принципиально изменяет представление о конструкции и технологии не только СБИС, но и вообще радиоэлектронных изделий.

Это только первый шаг к реальному осуществлению недорогого ОЭТ, работающего при комнатной температуре и подходящего для промышленного использования. В результате выполнения проекта ожидается, что будут разработаны и исследованы опытные образцы ОЭТ.

ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGY FOR MICRO- AND NANOELECTRON DEVICES

V.A. SOKOL

Abstract

Results of electrochemical technology creating of micro- and nanoelectronics facilities mainly hybrid microcircuits and multichip packages are cited. Aluminium substrates, multiple-level system of interconnections and aluminium frames for VLSI-circuits technologies are viewed. Results of electrochemical technology creating of nanoelectronics facilities such as operated matrix field-emission cathodes and transistors, based on single-electron transport quantum effect are presented.

Литература

1. *Сокол В.А.* Конструктивно-технологические методы создания гибридных микросхем на основе алюминия и его анодных оксидов: Дис. ... д-ра техн. наук. Мн.:МРТИ, 1988.
2. *Лабунов В.А., Сокол В.А.* Электрохимическая алюмооксидная технология в микроэлектронике // Техника средств связи. Сер. ТПО. 1988. Вып. 3. С.30-39.
3. *Сокол В.А., Воробьева А.И., Игнашев Е.П.* Алюминиевые подложки. Пат. РБ № 1998114, 1998.
4. *Сокол В.А., Воробьева А.И.* Многокристалльные модули на анодированной алюминиевой подложке // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2002. С. 40-45.
5. *Кренделев А.Е.* Технологические средства изготовления микрополосковых линий для ГИС КВЧ-диапазона // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2002. С. 33-39.
6. Повышение надежности двухслойных соединений благодаря применению анодированного алюминия // Электроника. 1971. Т.44, №7. С. 13-14.
7. *Labunov V.A., Sokol V.A., Parkun V.M., Vorobyova A.I.* Process for making multilevel interconnections of electronic components. Pat. USA № 5580825, 1993.
8. *Sokol V.A., Parkun V.M., Vorobyova A.I., Labunov V.A.* Metod of making multilevel interconnections of electronic parts. Pat. USA №5880021, 1999.
9. *Сокол В.А., Гринис Л.М.* Способ получения паяемого покрытия на тонких пленках алюминия. Пат. РБ №4492, 2002.
10. *Сокол В.А., Воробьева А.И., Уткина Е.А.* Резистивно-коммутационная тонкопленочная микросхема и способ ее изготовления. Пат. РБ №19981193, 1998.
11. *Lezenes S., Sokol V.A., Labunov V.A.* Multilevel interconnections of electronic components. Pat. USA № 6069070, 2000.
12. *Sokol V.A., Kuraev A.A., Sinitsyn A.K., Grinis L.M.* Fabrication and performance simulation of nanodimensional matrix field-emission cathodes. in: Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, ed. Borisenko V.E., Filonov A.V., Gaponenko S.V., Gurin V.S. 1999. PP.280-286.
13. *Gorter C.J.* A possible explanation of the increase of the electric resistance of thin metal films at low temperatures and small field strength // Physica. 1951. Vol.15. P.777.
14. *Neugebauer C.E. and Webb M.B.* Electrical conduction mechanism in ultrathin, evaporated metal films // J. Appl. Phys. 1962. Vol.33. PP.74.
15. *Lambe J. and Jaklevich R.C.* Charge-quantization studies using tunnel capacitor // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol.22. P. 1371.
16. *Kulik I.O. and Shekhter R.I.* Kinetik phenomena and charge discreteness effects in granular media // Sov. Phys. JETP. 1975. Vol.41. P.308.
17. *K.K. Likharev.* Correlated discret transfer of single electrons in ultrasmall tunnel junctions // IBM J. Res. Devel. 1988. Vol.32. P.144.
18. Single Charge Tunneling, ed. By H. Grabert and M.H. Devoret, New York Plenum, 1992.
19. *Likharev K. K.* Single-Electron Devices and Their Applications // Proc. IEEE. 1999. Vol.87. P.606.