

БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОММУТАЦИОННОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ВЫСОКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Н.А. Дюжев¹, М.А. Махиборода¹, Д.В. Новиков¹,
А.В. Ильичёв², А.А. Подобин²

¹*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

²*Департамент прикладной математики МИЭМ,
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

m.makhiboroda@gmail.com, ilichevalexy@mail.ru

Поступила 15.02.2018

В современной технологии микроэлектронного производства по целому ряду параметров достигнуты предельные показатели, ограничивающие возможности ресурсного роста систем, размещённых на кристалле. Стратегия роста вычислительных мощностей переносится в область создания гибридных многокристалльных систем. При этом важнейшей проблемой становится выбор стратегии и принципов построения коммутационной среды. По нашему мнению наиболее перспективными являются сетевые принципы построения распределённой коммутационной среды, состоящей из набора базовых коммутационных модулей малой размерности. Базовые модули обеспечивают полнодоступную коммутацию, высокие скорости обменов и отсутствие потерь на реализацию протоколов и ожиданий обслуживания. В настоящей статье рассмотрены принципы построения базовых коммутационных модулей и технология их производства на основе высокочастотных вакуумных триодов с автоэмиссионными катодами.

УДК 537.533.2

1. Общая стратегия роста ресурсов высокопараллельных вычислительных систем

Современное состояние технологии микроэлектронного производства и объявленные перспективы её развития позволяют определить обоснованную стратегию роста ресурсов вычислительных средств на ближайшее десятилетие. В технологии производства СБИС прогнозируется устойчивый и длительный рост числа транзисторов на кристалле, который может достигать порядка 1 триллиона, что позволит в принципе дове-

сти число процессорных элементов на одном кристалле до миллиона штук. Вместе с тем в последние годы произошло разумное переосмысление направлений развития и осознание факта наличия объективных ограничений. В первую очередь это проблема тепловыделения и необходимость обеспечения энергоэффективности кристалла. Как минимум это означает ограничение роста тактовой частоты, поскольку показатели тепловыделения пропорциональны квадрату частоты. После достижения значений 5,2 ГГц технологи сочли дальнейший рост тактовой частоты нецелесообразным, поскольку затраты на теплоотвод и принудительное охлаждение становились чрезмерными. По разным данным значение тактовой частоты 2,2 ГГц было выбрано в качестве оптимального. В последнее время появились сообщения об использовании в структурах суперкомпьютеров элементов с тактовой частотой 0,5 ГГц.

Кроме того, имеет место всё более широкое применение различных критериев оценки энергоэффективности кристалла. Борьба за повышение энергоэффективности ведётся в области принятия архитектурных и схемотехнических решений и направлена на устранение различных форм избыточности схемных решений. На предыдущем этапе развития схемотехники избыточность не считалась критичной в силу низкой стоимости транзисторных ресурсов. В настоящее время при высоких тактовых частотах схемная избыточность проявляется в виде неприемлемого тепловыделения. Поэтому схемотехники при проектировании должны строго отвечать не только за экономичность временной диаграммы, но и за рациональное соотношение ресурсных затрат, выраженное вопросом – сколько транзисторов затрачено на обеспечение данной операции. Транзисторы выделяют тепло, а процесс тепловыделения должен быть поставлен под строгий контроль.

Предположение о том, что теперь основным направлением роста станет освоение массового параллелизма также связано с серьёзными проблемами и ограничениями. Неограниченный рост числа процессорных элементов на кристалле противоречит здравому смыслу, поскольку число внешних выводов ограничено и рост производительности внутри кристалла должен быть приведен в соответствие с возможным темпом загрузки исходных данных и выгрузки результатов. Таким образом, производительность кристалла должна быть сбалансирована по тактовой частоте, по энергозатратам и по производительности внешней границы, а это означает, что суммарная вычислительная мощность кристалла должна быть существенно ограничена.

Проблематика роста вычислительной мощности переносится в область освоения современных технологий построения гибридных систем с интеграцией множества бескорпусных кристаллов. Особый интерес и актуальность приобретают современные технологии многослойной вертикальной интеграции, которые открывают перспективы объёмной трёхмерной компоновки. В этой ситуации важную роль играют архитектурные решения, обеспечивающие системное взаимодействие большого числа процессорных элементов. Практика построения предыдущих поколений многопроцессорных систем основана на принципах создания большого процессорного пула, объединённого средствами большого коммутационного поля. Предшествующий опыт эксплуатации показывает, что такая стратегия параллелизма не имеет перспективы для создания систем с массовым параллелизмом. При создании больших коммутационных полей процессорный пул из ста и более элементов становится очень зависимым от типов решаемых задач. В общем случае, при относительно активном взаимодействии параллельных ветвей процесса большой процессорный пул с общим коммутационным полем демонстрирует падение производительности при росте его размерности выше нескольких со-

тен. Расчёты ожидаемой динамики роста производительности высокопараллельных систем с общим коммутационным полем приведены в [1], [2].

Коммутационные поля большой размерности в принципе не могут строиться по полнодоступной схеме. Единственный возможный путь это построение различных схем с частичным доступом, в которых пара обменивающихся абонентов монополизирует часть ресурсов коммутатора на время сеанса обмена. При этом часть поступающих заявок на обмен может быть удовлетворена свободными ресурсами коммутатора, а часть ставится в очередь и ожидает освобождения занятых ресурсов. Работа коммутатора управляется специальным контроллером, который поддерживает достаточно сложный протокол приёма потока заявок на соединение, осуществление определённой стратегии приоритетов и очередности, а также арбитража конфликтующих заявок. Отрабатывая принятую заявку, контроллер должен проложить путь осуществления сеанса, провести пробную передачу с установкой синхронизации и запустить сеанс обмена. При возникновении конфликтной ситуации запустить процедуру арбитража и поставить менее приоритетные заявки в очередь на ожидание обслуживания. По мере завершения сеансов обмена контроллер восстанавливает исходное состояние коммутатора и отрабатывает следующие заявки. Следует учитывать, что каждый конкретный сеанс обмена данными кроме затрат собственно на передачу данных несёт обязательные затраты на выполнение протокольных действий и по определённой статистике затраты на ожидание в очереди.

Крупноразмерные коммутационные поля строятся из модулей средней размерности по некоторой выбранной стратегии, образуя сложные многозвенные и многоуровневые конструкции. При этом каждый конкретный сеанс обмена данными прокладывая свой путь в общем коммутационном поле будет многократно обращаться к разным блокам, звеньям и уровням иерархии и каждое такое обращение будет нести временные затраты на протокольные события и ожидания в очереди на обслуживание. В стратегии роста размерности коммутационных полей заложен порочный принцип – по мере наращивания размерности обеспечивается общий рост пропускной способности коммутатора в целом, но время обмена данными для каждого отдельного сеанса при этом возрастает, поскольку растёт число протоколов, обеспечивающих переходы между звеньями и уровнями иерархии. Предполагается, что этот эффект нивелируется выбором высокочастотных и высокоскоростных элементов при построении коммутационного оборудования. Однако при больших числах размерности процессорного пула переломить указанную тенденцию не удаётся. В целом динамика роста производительности таких систем имеет пик в области нескольких сотен процессорных элементов и далее неуклонно падает. При этом в общем балансе временных затрат время вычисления становится исчезающе малым, а время межпроцессорных обменов данными превращается в быстро растущую доминанту. Таким образом, выбор принципов и технологии построения коммутационной среды становится главной проблемой обеспечения роста производительности вычислений на современном этапе развития высокопараллельных вычислительных систем.

Там же в [1] [2] изложены принципы построения перспективных высокопараллельных систем на базе сетевых технологий интеграции процессорных элементов и распределённых принципов управления вычислениями. В данной концепции процессоры не объединяются в крупноразмерный пул с общим полем коммутации, а создаётся распределённая сеть малоразмерных кластеров, объединённых локальными коммутационными блоками малой размерности, построенными по полнодоступной схеме. Для осу-

ществления предложенных технологий интеграции требуются высокоскоростные коммутационные модули малой размерности, обеспечивающие полную доступность коммутации и не создающие задержки на реализацию протоколов и ожидания в очередях на обслуживание. (Под малой размерностью подразумевается порядок нескольких десятков). Кроме того, коммутационные блоки должны быть технологически совместимыми с основной схемотехникой вычислительных ресурсов и должны позволять вести межпроцессорные обмены машинными словами в темпе тактовой частоты процессора.

Коммутационные модули, отвечающие перечисленным требованиям, могут быть созданы на базе многоканального тракта передачи данных с кодовым разделением каналов CDMA (Code Division Multiple Access). Суть кодового разделения каналов, заключается в том, что множество абонентов передают свои сигналы в общий тракт передачи через индивидуальные кодовые ключи, а в передающем тракте все сигналы суммируются. На приёмном конце тракта все принимающие абоненты принимают общий суммарный сигнал и приступают к выделению своего канала методом накопления. Накопление это последовательное суммирование, которое каждый абонент осуществляет через свой индивидуальный кодовый ключ, совпадающий с кодовым ключом передатчика данного канала. В результате каждый принимающий абонент выделяет из общей суммы сигнал своего канала. Использование CDMA тракта в качестве полнодоступного коммутатора, основано на идее гибкой перестройки конфигурации передачи данных через распределение кодовых ключей на приемном конце тракта. Меняя загрузку кодовых ключей в наборе принимающих абонентов можно оперативно создавать любые конфигурации связи передающих абонентов с принимающими.

2. Конструкция одиночного CDMA тракта цифровой передачи сигнала

Необходимой платой за повышение пропускной способности CDMA тракта является повышение тактовой частоты внутри тракта по сравнению с тактовой частотой обмена у отдельных абонентов. Если CDMA тракт поддерживает передачу 64 независимых каналов, он должен затрачивать 64 посылки для выделения методом накопления одного бита передаваемой информации для каждого канала. В CDMA тракте в этом случае должно функционировать 64 кодовых ключа длиной по 64 разряда каждый. При этом кодовые ключи должны иметь для всех возможных пар максимальное число отличающихся разрядов. Другими словами набор кодовых ключей представляет собой систему кодов, имеющих попарно максимальную удалённость друг от друга в метрике Хэмминга. (Напомним, что единицей расстояния между кодами в метрике Хэмминга является один несовпадающий разряд.) Если CDMA тракт поддерживает 64 канала, тактовая частота внутри CDMA тракта должна быть в 64 раза выше тактовой частоты обмена принятой для пары обменивающихся абонентов.

При конструировании CDMA тракта была принята цифровая форма представления данных. Регистровая схема организации тракта приведена на Рис. 1. На схеме для наглядности изображён пример с поддержкой 4 каналов.

Передающие абоненты обозначены кругами в левой части рисунка. Далее идёт блок сдвиговых регистров, в которых размещаются каналные кодовые ключи. Абоненты передают свои биты в тракт через сдвиговые регистры. Если абонент передаёт единицу, выходной клапан сдвигового регистра открыт и регистр последовательно по микротактам передаёт в тракт свой ключ как индивидуальную последовательность нулей и единиц. Если абонент передаёт 0, выходной клапан сдвигового регистра закрыт и в течение

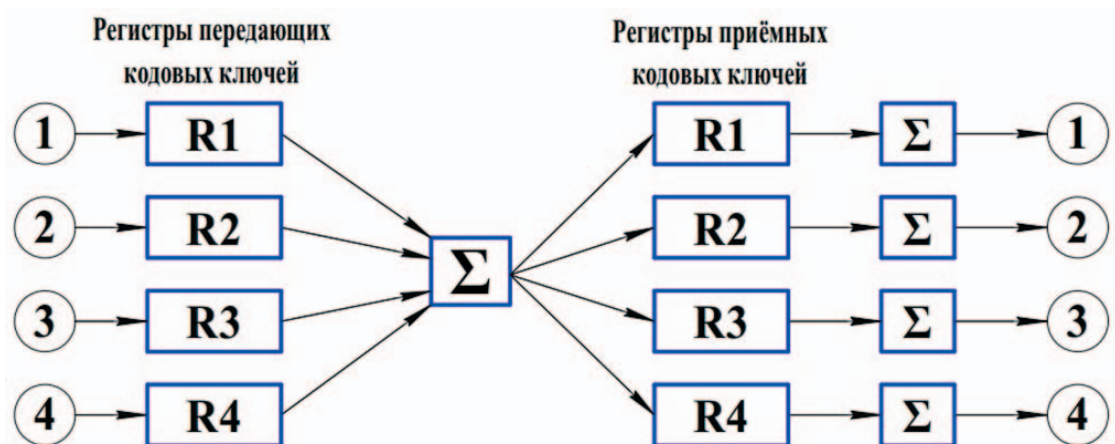


Рис. 1. Регистровая схема организации одиночного CDMA тракта с поддержкой 4 каналов

всего такта передачи в тракт ничего не поступает. Совокупность всех выходов блока сдвиговых регистров на каждом микротакте передачи представляет собой битовый вектор текущего состояния тракта. Далее этот битовый вектор или выходы всех сдвиговых регистров подаются на блок сумматора, который в каждом микротакте передачи подсчитывает число единиц в выходном битовом векторе. Это и есть суммарное состояние передающего тракта в текущем микротакте.

Число, представляющее суммарное состояние тракта фиксируется в выходном регистре сумматора и передаётся на все входы приёмной части тракта. Роль сдвиговых регистров в приёмной части тракта сводится к управлению передачей принятого числа в индивидуальные накапливающие сумматоры каналов. Кодовые ключи сдвигаются в приёмных регистрах по микротактам синхронно с передающими, выходные разряды регистров управляют ключами передачи принятого числа в индивидуальные накапливающие сумматоры. Если кодовый ключ в текущей позиции имеет значение 1, принятое число проходит в накапливающий сумматор, если 0 подача числа в сумматор не происходит и сумматор пропускает шаг суммирования. В каждом индивидуальном сумматоре канала накапливается сумма текущих чисел, которая фиксируется выходным регистром сумматора. По завершении цикла передачи в блоках сумматоров производится операция порогового отделения и таким образом определяется содержание переданной информации для каждого канала – передал он 0 или 1. В ходе конструирования одиночного CDMA тракта могут быть рассмотрены разные варианты алгоритмов суммирования и ориентировочные варианты схемной реализации сумматоров.

3. Определение конструкции линейки матричных коммутаторов разной размерности.

Регистровая организация одиночного CDMA тракта даёт представление о том, какой объём оборудования ориентировочно должен функционировать на частотах значительно более высоких чем тактовая частота процессорных элементов. При этом если размерность проектируемого коммутационного модуля будет равняться 32, а тактовая частота процессоров достигать 2,2 ГГц тактовая частота CDMA тракта должна быть не меньше чем 70,4 ГГц. По этой причине в качестве элементной базы для реализации CDMA тракта были выбраны твёрдотельные кремниевые высокочастотные триоды, построенные на базе автоэмиссионных катодов.

В ходе выполнения работ по конструированию базового элемента были проведены работы по математическому моделированию вольтамперных и частотных характеристик планарного автоэмиссионного триода с лезвийным полевым эмиттером. Основные результаты моделирования представлены в работе [3]. На Рис. 2 приводятся частотные характеристики триода при разных заданных нормах проектирования.

На оси X представлены значения напряжения на управляющей сетке V_c триода в вольтах, на оси Y представлены значения максимальной частоты в терагерцах, разные кривые соответствуют разным проектным нормам, принятым при производстве триодов. (Напомним, что показатель «норма проектирования» отражает масштаб миниатюризации в планарной проекционной микроэлектронной технологии и представляет наименьший реализуемый размер в нанометрах.)

При существующей технологии производства лезвийные автоэмиссионные катоды могут размещаться на кремниевой подложке регулярным образом с шагом 4 мкм. Примем размер кристалла 10 на 10 мм и будем считать, что часть площади занимают контактные площадки внешних выводов, размещённые по периметру, а площадь размещения активных элементов образует квадрат 6 на 6 мм. Тогда получается, что на кристалле можно разместить 2.250.000 автоэмиссионных триодов. Это есть доступный ресурс для построения высокочастотной схмотехники, поддерживающей необходимый CDMA тракт. Схмотехника реализации CDMA тракта представлена блоками сдвиговых регистров, сопутствующей логикой и схемами сумматоров. Основой построения регистровых схем является типовая триггерная ячейка, обрамлённая входными и выходными клапанами, построенными на триодной логике. Примем ориентировочно с избытком, что на реализацию одной типовой ячейки потребуется 25 триодов. Следовательно, наш кристалл позволяет иметь 90.000 таких ячеек.

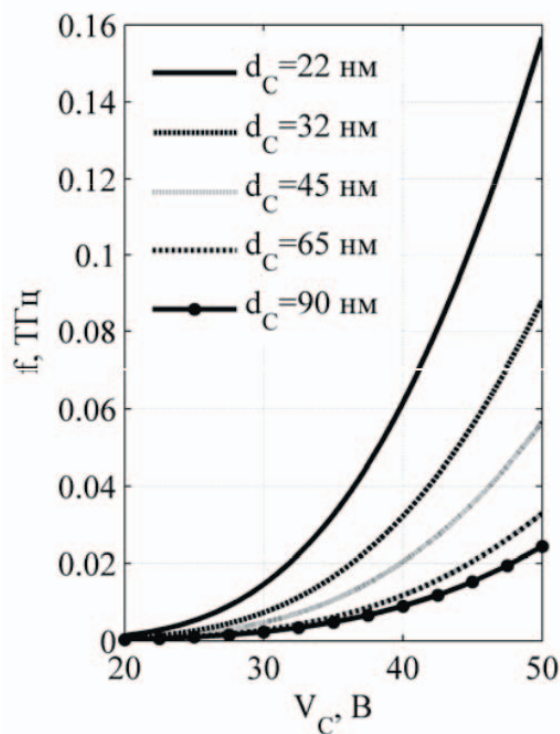


Рис. 2. Расчётные частотные характеристики триода при заданных нормах проектирования

Ориентировочный расчёт показывает, что при построении одиночного CDMA тракта на 32 канала понадобится 3000 ячеек. Если мы намерены построить коммутационный модуль на 32 канала, поддерживающий параллельный обмен машинными словами по 32 разряда, понадобится задействовать 32 одиночных CDMA тракта и, следовательно, расход ячеек составит $3000 \times 32 = 96000$ штук, что вписывается в порядок допустимых величин, с учётом избыточности первоначальных предположений.

Следующим принципиальным ограничителем является допустимое число внешних выводов в корпусе. Для поддержки параллельных обменов 32-х разрядными словами понадобится 32×32 входных и 32×32 выходных контактов, что составит 2048 штук. В настоящее время реально используются корпуса под **Socket 1366** и **Socket 1155**, следовательно, можно считать 2048 внешних выводов теоретически достижимым. Реально в существующие ограничения по числу контактов вписывается модуль на 16 каналов, для которого потребуется не менее чем 1024 вывода. При других размерностях коммутатора и при использовании существующих сокетов и корпусов придётся строить обмен последовательно меньшими группами, например полусловами или байтами. При обоснованной необходимости и экономической целесообразности возможно проектирование специальных сокетов и корпусов с увеличенным числом контактов. Кроме того, в гибридных технологиях интеграции бескорпусных кристаллов проблема наращивания числа внешних выводов не столь критична и позволяет нарастить их в пределах принятого порядка в несколько тысяч.

При значениях размерности коммутатора 32 канала и тактовой частоте процессорных элементов 2,2 ГГц тактовая частота CDMA тракта должна быть 70,4 ГГц. Из графика на рис 2 следует, что это достижимо при проектных нормах 32 нм и напряжениях на сетке чуть менее 50 В. Таким образом, рассмотренный пример коммутационного модуля на 32 канала с параллельным обменом 32-разрядными словами и тактовой частотой абонентов 2,2 ГГц является предельно возможным, обозначающим гипотетические границы реализации проекта.

В реальности по всем рассмотренным параметрам возможны менее жёсткие решения. По расходу активных элементов в реальности нет необходимости полного повторения всего объёма оборудования для каждого CDMA тракта. Массивы сдвиговых регистров, порождают управляющие сигналы и во всех 32 трактах, поддерживающих отдельные разряды машинных слов, идентичны. Следовательно, на весь коммутатор достаточно иметь один массив передающих и один массив принимающих сдвиговых регистров и далее разводить порождаемые ими управляющие сигналы по всем трактам. В результате схемотехника выстраивается в матричную структуру разводки сигналов для управления ортогональным массивом накапливающих сумматоров. При этом расход активных элементов становится на порядок меньше, чем это было описано выше.

По тактовой частоте возможна вариабельность как минимум в диапазоне от 0,5 до 2,2 ГГц, а это расширяет возможности реального конструирования коммутационных модулей и выбора значений тактовых частот CDMA тракта и приемлемых проектных норм. Реально можно проектировать линейку матричных коммутаторов с различной размерностью в диапазоне от 16 до 64 каналов при предельных проектных нормах 45-65 нм.

4. Разработка технологии изготовления автокатодных матриц

Производство твёрдотельных триодов на базе автоэмиссионных катодов является одним из успешных и востребованных в современной микроэлектронике технологических процессов. Данная технология относится к сравнительно новой отрасли микроэлектронного производства, называемой нано-электро-механические системы (НЭМС). НЭМС унаследовала основные технологические приёмы из планарной проекционной технологии микроэлектроники. Особенности технологии НЭМС заключаются в том, что она направлена на производство из кремния путём избирательного травления сверхминиатюрных трёхмерных геометрических фигур и деталей разнообразных машин и механизмов. В технологии НЭМС производятся сверхминиатюрные гироскопы, насосы, сенсорные системы и много других изделий из класса нано-электро-механические системы. Технология НЭМС позволяет возродить на современном технологическом уровне и дать второе дыхание давно утраченным изделиям вакуумной электроники. При этом появляется возможность сохранить неоспоримые преимущества элементов вакуумной электроники и в тоже время органично вписать их в современные масштабы и технологии микроэлектронного производства. Важно отметить ещё один интересный факт – для нормальной работы твёрдотельных миниатюрных вакуумных электронных приборов не требуется откачка воздуха и создание высокого вакуума. Протяжённость пути электронов в НЭМС приборах настолько мала, что вероятность их столкновения с какими-либо объектами в воздушной среде равна этому показателю в высоком вакууме для традиционных приборов вакуумной электроники.

Один из многочисленных возможных вариантов конструкции твёрдотельного триода с автоэмиссионным катодом приведен на рис. 3

Основная задача изготовления триода заключается в том, чтобы вытравить в толще кремниевой подложки лунку, внутри которой располагается конус заданной формы. Для того чтобы конус выполнял роль автокатода и обеспечивал автоэлектронную эмиссию, необходимо сформировать на конце пирамидки заострение с радиусом скругления не более чем 20 - 30 нм. Далее необходимо сформировать вокруг пирамидки поясok из проводящего материала, который выполняет роль сеточного электрода. В завершении над пирамидкой располагается проводящий анод. В приведенном примере указываются материалы различных компонентов вакуумного триода. В различных реализациях материалы могут варьироваться, чаще всего рассмотренный катодный узел вытравливается из кремниевой подложки и материалом автокатода является кремний.

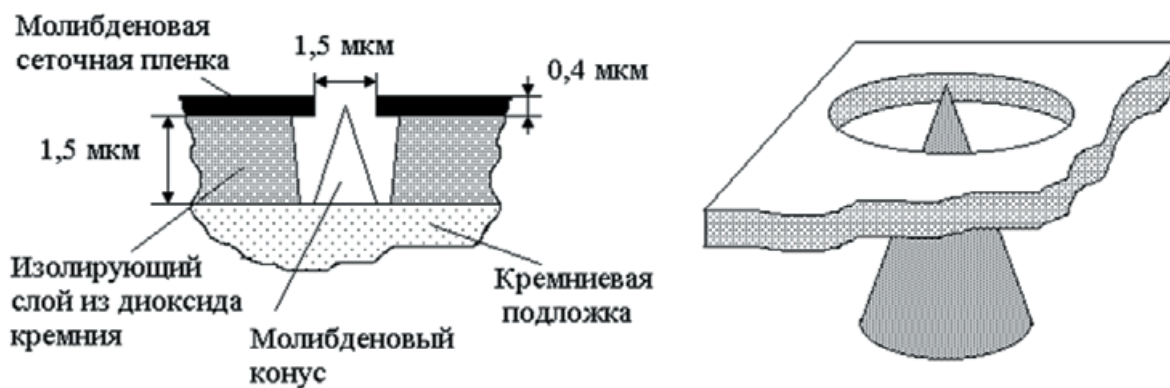


Рис. 3. Конструкция твёрдотельного вакуумного триода с автоэмиссионным катодом

Эксперименты по созданию различных автокатодных узлов показали, что автоэмиссионный катод пирамидальной формы (так называемый острый катод) при длительной работе в режиме поддержания автоэмиссионного тока подвержен тепловому разрушению и может терять эмиссионную способность. В целом тепловые процессы в автоэмиссионных катодах это серьёзная проблема, решение которой определяет жизнеспособность данного класса микроэлектронных изделий. Некоторые результаты экспериментальных исследований и математического моделирования теплового разрушения автоэмиссионных катодов приведены в [4] [5]. Тепловая деградация автоэмиссионного катода в значительной мере зависит от его геометрии и так называемого формфактора. Были проведены поисковые эксперименты и в итоге, предпочтение было отдано лезвийным автоэмиссионным катодам. Лезвийный автокатод имеет форму треугольной призмы. Общий вид лезвийного автокатодного узла приведен на Рис. 4. Снимок сделан на растровом электронном микроскопе.

На Рис. 5 приводится более детальное изображение катодного узла на срезе кремниевой подложки.

Ниже в Таблице 1 приводится технологический маршрут изготовления катодных узлов с лезвийными катодами. Он содержит основные операции планарной кремниевой микроэлектронной технологии, которая начинается с нанесения на кремниевую пластину фоторезиста, затем следуют операции фотолитографии, состоящие из фотоэкспозиции технологической маски и смывки экспонированного фоторезиста. Затем идёт плазменно-химическое травление и ряд других операций.

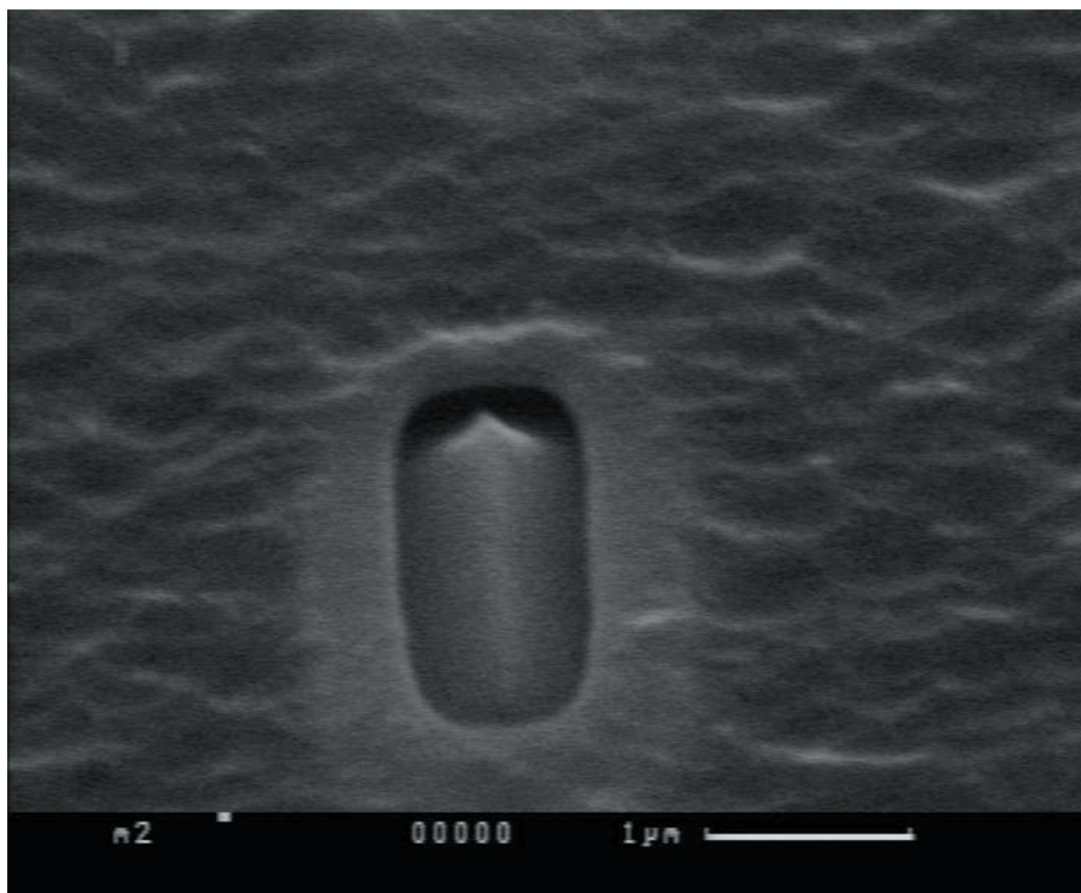
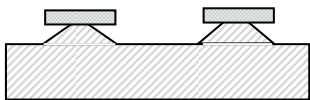
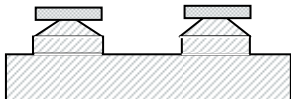
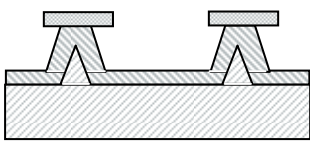
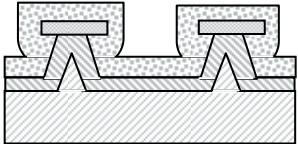
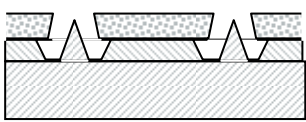


Рис. 4. Общий вид катодного узла с лезвийным автоэмиссионным катодом

Таблица 1

1. Нанесение Si_3N_4	
2. Фотолитография по Si_3N_4	
3. Изотропное травление кремния	
4. Анизотропное травление кремния	
5. Окисление	
6. Нанесение поли-Si*	
7. Химико-механическая полировка	

Технологический маршрут и режимы управления операциями травления разрабатывались с использованием развитой математической модели формирования катода при сочетании различных способов травления кремния и требований, предъявляемых к процессам травления. Был разработан процесс последовательного комбинированного плазмохимического изотропного и реактивно-ионного анизотропного травления монокристаллической кремниевой подложки через маску фоторезиста из нитрида кремния с получением глубокого рельефа требуемого профиля.

На Рис. 6 приводится изображение фрагмента маски катодного слоя, которое даёт представление о структуре автокатодной матрицы, содержащей 2000 автокатодных узлов и заполняющей активную площадь экспериментального кристалла.

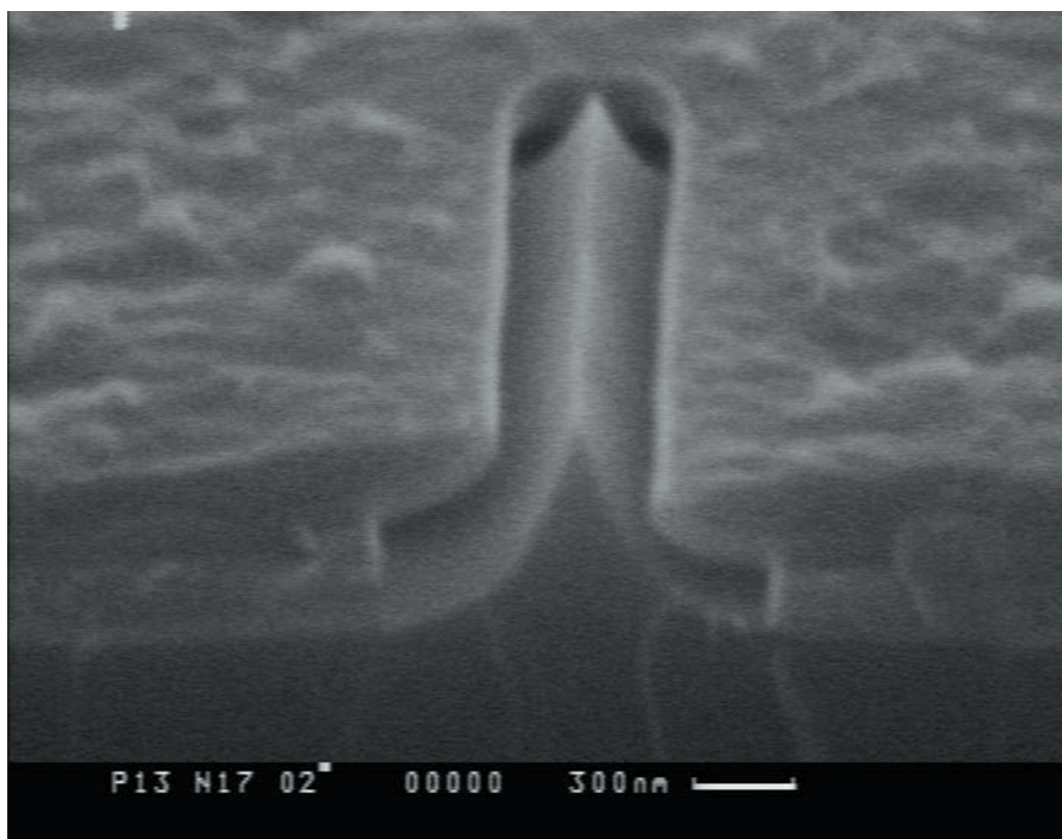


Рис. 5 Детализация катодного узла на срезе кремниевой подложки

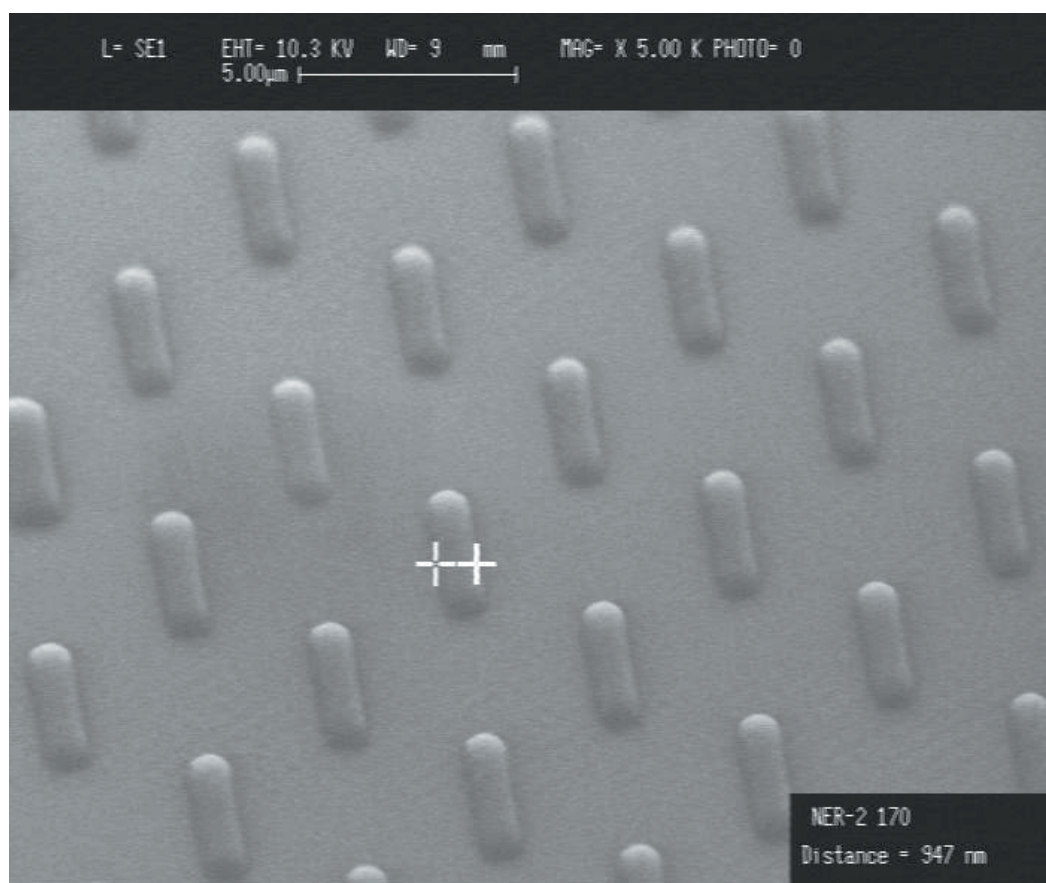


Рис. 6. РЭМ-изображение фрагмента маски катодного слоя

Следующий этап разработки это испытание произведенных изделий тестирование их электрических характеристик, определение структуры эмиссионных токов, построение вольт-амперных характеристик. Проводилось так же математическое моделирование распределения электрического поля и траекторий имитированных электронов.

Важнейшим элементом проводимых экспериментов являлся контроль геометрических параметров автокатодных узлов. Именно связь полученных электрических характеристик с геометрическими параметрами давала направления поиска и корректировки технологии производства с целью получения стабильных, и эффективных изделий.

Разрабатываемые изделия на основе лезвийных кремниевых автоэмиссионных катодов имеют субмикронные и нанометровые критические геометрические размеры. Контроль радиуса закругления лезвийного катода (в нанометровом диапазоне) и ширины щели управляющего электрода (в субмикронном диапазоне) является необходимым условием обеспечения работоспособности катодного элемента. Существенным является также контроль толщины и качества технологических слоёв окисла кремния, поликремния, нитрида кремния и т.п.

Контроль микрогеометрии рассматриваемых структур осуществлялся, в основном, растровой электронной микроскопией (РЭМ). Ширина щели управляющего электрода и общий вид изготовленного узла может контролироваться при съёмках в микроскопе структур на пластинах при их нормальном расположении по отношению к электронному зонду или с наклоном вплоть до нескольких десятков градусов. Более детальный анализ микрогеометрии проводился на поперечных сколах исследуемого кристалла. В некоторых случаях требовалась дополнительная обработка таких РЭМ-изображений для измерения ширины щели управляющего электрода и зазоров между лезвием и электродом. Дополнительная обработка проводилась средствами специализированной компьютерной программы, разработанной ранее.

Контроль ряда критических микроразмеров элементов автокатодных узлов растровой электронной микроскопией является, как указывалось, разрушающим в связи с необходимостью приготовления скола исследуемого образца. При этом отсутствует возможность локализации скола в заданном месте кристалла. В связи с этим, в дополнение к исследованиям на РЭМ использовались методы атомно-силовой микроскопии (АСМ), которые позволяют осуществлять неразрушающую визуализацию геометрии элементов и измерение их топологических размеров, в том числе в нанометровом диапазоне. Проводились исследования катодных массивов и отдельных элементов на изготовленных экспериментальных кристаллах методами АСМ с использованием оборудования компании NT-MDT (Россия). Исследования выполнялись с использованием оптического наведения с визуализацией на отдельном мониторе с помощью видеокамеры. Измерения проводились в режиме полуконтактной ("tapping") моды АСМ, обеспечивающей наибольшую чувствительность при практически полном отсутствии воздействия на сканируемую поверхность.

На Рис. 7 в качестве иллюстрации показано АСМ изображение фрагмента тестового массива автокатодов.

На Рис. 8 показано АСМ изображение отдельного катодного узла.

Недостатком АСМ методов является возможность появления искажений отображаемого рельефа на стенках, близких к вертикальным и невозможность отображения стенок с отрицательным наклоном. Точность измерения горизонтальных размеров ограничивается радиусом скругления вершины зонда кантилевера, который в стандартных

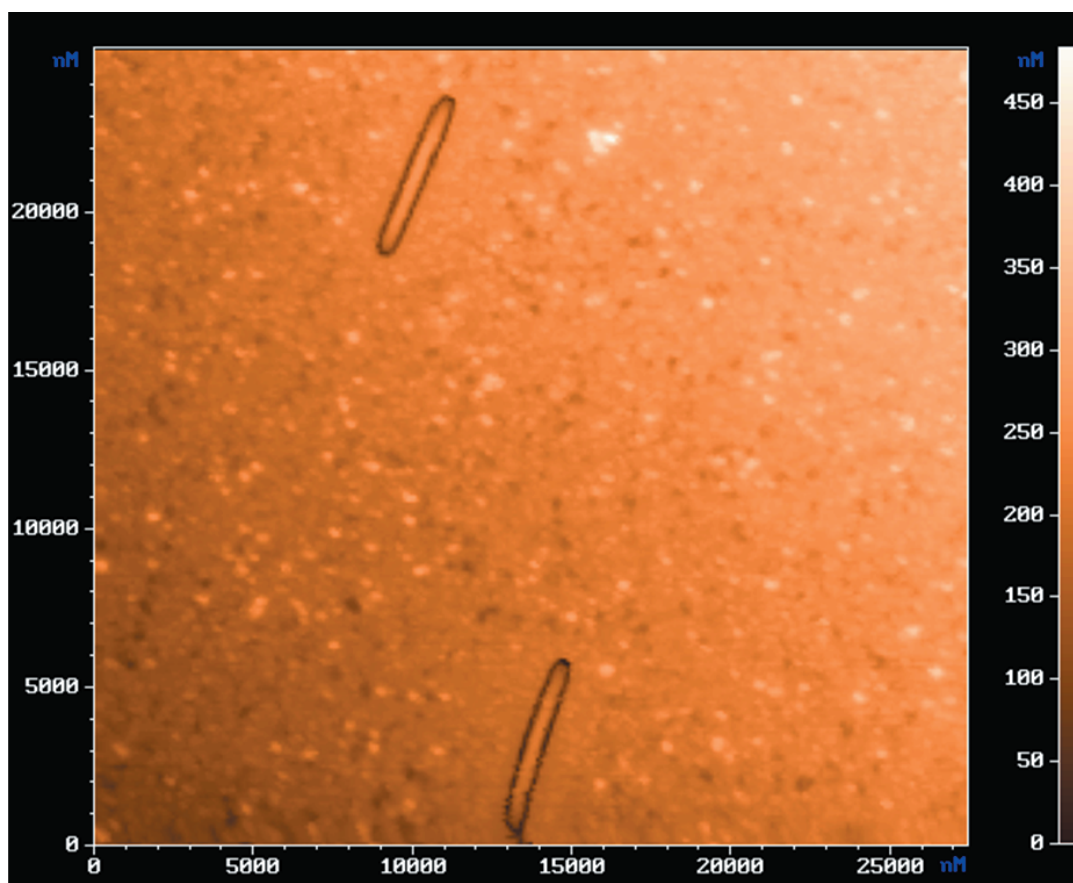


Рис. 7. Изображение фрагмента тестового массива автокадов, полученное методом атомно-силовой микроскопии

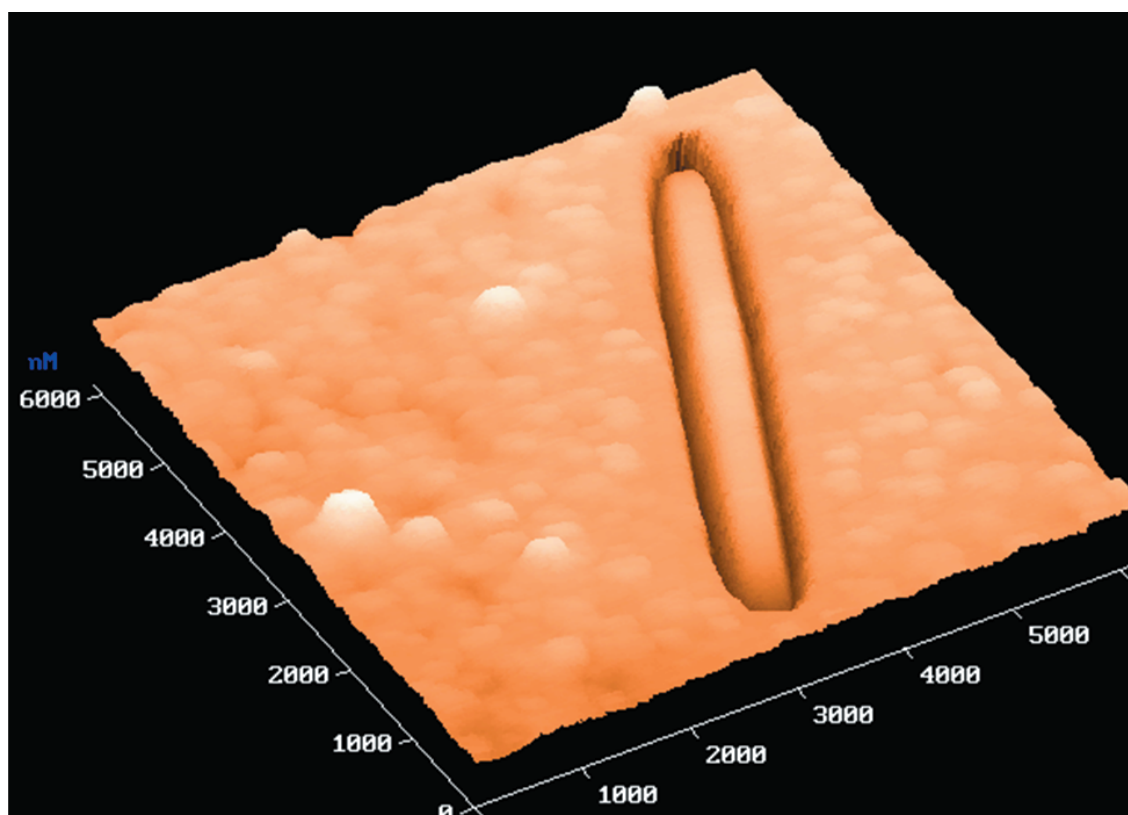


Рис. 8. АСМ изображение отдельного катодного узла

кантилеверах может достигать значений порядка 20 – 30 нм. Поэтому для измерений с более высоким разрешением потребовалось использование кантилеверов с заостренным зондом (специально изготовленных или отобранных).

Совместное использование РЭМ и АСМ методов позволило компенсировать недостатки каждого отдельного метода и существенно расширить возможности исследования микрогеометрии структур и измерения их критических размеров.

Анализ полученных результатов показал достаточно хорошую воспроизводимость микрогеометрических параметров катодных элементов. Измерения показали, что радиусы закругления лезвий имеют размер на уровне 20 - 30 нм и ширину щелей вытягивающего электрода на уровне 0.5 – 0.7 мкм. АСМ исследования показали, однако что может иметь место значительная неоднородность радиуса вершины вдоль лезвия. АСМ измерения выявили также различное положение вершины лезвия по отношению к плоскости сеточного электрода.

Заключение

В результате проведенных исследований была отработана технология изготовления массивов кремниевых автоэмиссионных катодных узлов, позволяющая получать реальные параметры, хорошо согласующиеся с расчетными.

На основе анализа полученных экспериментальных данных с использованием математического моделирования выявлены проблемы в достижении требуемых эмиссионных характеристик, регистрируемых на анодном электроде и предложены возможные пути оптимизации конструкции и технологии изготовления.

Разработана технология электронно-лучевой литографии по формированию топологии катодного узла с проектной нормой 0,6 мкм. Разработан состав негативного электронорезиста NER-2 и технология его применения в процессе прямой электронолитографии при изготовлении катодных автоэмиссионных узлов на пластинах монокристаллического кремния.

Развиты методы контроля и измерения характеристик эмиттерных элементов и автокатодных матриц.

Показана возможность получения работоспособных автоэмиссионных массивов. Автоэмиссия регистрировалась в расчетном диапазоне сеточных напряжений. На единичных образцах наблюдаемые значения анодного тока практически совпадали с катодным, что свидетельствует об отсутствии утечек через сеточный электрод.

Таким образом был успешно завершён первый базовый этап разработки НЭМС технологии производства работоспособных матриц автоэмиссионных катодных узлов с проектной нормой 0,6 мкм. Далее был проведен комплекс работ по оценке электрических параметров и частотных характеристик при масштабировании проектных норм. Результаты изложены в [3]. В итоге имеется возможность проектирования и разработки базовых коммутационных блоков собственными силами и заказ их изготовления на условиях аутсорсинга, в том числе на предприятиях, дислоцированных на территории РФ.

Литература

1. Махиборода А.В., Ильичёв А.В., Подобин А.А. Проблемы реализации массового динамического параллелизма. I // Наноструктуры, математическая физика и моделирование, 2016. 14(1) 41-68
2. Махиборода А.В., Ильичёв А.В., Подобин А.А., Царёв А.В. Проблемы реализации массового динамического параллелизма. II // Наноструктуры, математическая физика и моделирование, 2016. 14(2) 25-68
3. Дюжнев Н.А., Махиборода М.А., Грязнева Т.А., Агарков Е.А., Дёмин Г.Д. Моделирование влияния масштабирования технологических норм на электрические и частотные характеристики планарного автоэмиссионного триода с лезвийным полевым эмиттером // Наноструктуры математическая физика и моделирование М. 2016 15(2) 39 – 51
4. Дюжнев Н.А., Махиборода М.А. Математическое моделирование тепловых процессов сопровождающих автоэлектронную эмиссию из наноразмерного острия // Известия высших учебных заведений, Электроника, №2 (88) 2011, с. 22-26
5. Дюжнев Н.А., Кретов В.И., Махиборода М.А., Руднев В.Ю., Чурилин М.Н. Исследование тепловой деградации кремниевого автоэмиссионного катода как двухфазной системы // Известия высших учебных заведений, Электроника, №4 (90) 2011, с. 23-29.

BASIC TECHNOLOGY FOR CONSTRUCTING THE COMMUTATION MEDIUM FOR HIGHLY PARALLEL COMPUTATIONAL SYSTEMS

N.A. Dyuzhev¹, M.A. Makhiboroda¹, D.V. Novikov¹,
A.V. Il'ichev², A.A. Podobin²

¹*National research university «MIET»*

²*Department of applied mathematic MIEM,
National research university «Higher school of economics»*

m.makhiboroda@gmail.com, ilichevalexy@mail.ru

Received 15.02.2018

In the contemporary microelectronic technology, several performance indices have attained their limit values, and this restrains the further increase in the resources of systems located on crystals. The strategy for increasing the computational capacity is now to design hybrid microcrystal systems, and the most important problem is the choice of the strategy and principles for constructing the communication medium. In our opinion, the network principles for constructing distributed commutation media, which are sets of basic small-dimensional commutation modules, are most perspective. The basic modules ensure fully accessible commutation, high rates of exchange, and the absence of losses for the protocol implementation and service expectation. In the present paper, we consider the principles for constructing the basic commutation modules and the technology of their production on the basis of high-frequency vacuum triodes with field emission cathodes. .