

ОПТИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ И ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССОРЫ

Э. Г. КОСЦОВ



Я хорошо помню начало 1972 г. Тогда по инициативе Президиума СО РАН происходила реорганизация Отделения вычислительной техники Института математики СО РАН. Жаль, что это произошло, основная причина - чисто субъективные факторы, отделение осталось без руководителей. К этому времени у нашего коллектива был большой опыт разработки элементов микроэлектроники - первые советские полевые тонкопленочные транзисторы на основе CdS, (1962-1963 гг.), диоды, туннельные диоды, конденсаторы, прецизионные сопротивления. В 1964 г. мы выполнили по заказу п.я. 651 (позже выяснилось, что это было ОКБ -1 С.П. Королева) крупную хоздоговорную работу "Разработка стандартных элементов для БЦВМ в пленочном исполнении" (на максимально возможную для ИМ СО РАН по тому времени сумму - 135 000 руб.). Несмотря на множество конкретных параметров для всех элементов и сжатые сроки - январь 1964 г. - январь 1965 г., мы все свои обязательства успешно выполнили, была дополнительно сделана также, на поверхности стеклянной подложки, первая микросхема - радиоприемник, принимающий местную радиостанцию. В том же году было заключено соглашение между ИМ СО РАН и п.я. 55 (ныне НПП "Восток") а также п.я. 27 (ныне ФГУП НИИЭП), о передаче технологии тонкопленочных приборов на НПП "Восток". По этому соглашению группа сотрудников п.я. 55 (в том числе ныне там же работающий начальник НПО В.Н. Гаштольд, всего 12 человек), в 1965 г. создала по предоставленной ИМ документации технологический участок - 6 вакуумных установок, с

соответствующей оснасткой, и "скопировала" тонкопленочные элементы, включая транзистор. Таким образом, на НПП "Восток" появилось микроэлектронное направление.

Когда стало известно о необходимости реорганизации, наш коллектив решил переходить в ИФП, с которым у нас тогда были достаточно хорошие связи. Достаточно сказать, что вновь назначенный директор ИФП А. В. Ржанов в 1964г. трижды бывал у нас (в июне он сопровождал визит к нам президента АН СССР В. С. Келдыша), с большим интересом расспрашивал о наших разработках, мы демонстрировали ему действующие образцы наших элементов, а в 1968 г. на Объединенном совете по физико-математическим и техническим наукам СО АН СССР, под его председательством, я защитил кандидатскую диссертацию "Исследование влияния микрорельефа поверхности электродов на процессы прохождения тока и явления пробоя в тонкопленочной системе металл-диэлектрик-металл".

О переходе в ИФП мы говорили с Александром Филипповичем Кравченко, который неоднократно приходил к нам по поручению А.В. Ржанова. Но мне неожиданно позвонил Ю. Е. Нестерихин и пригласил к себе для разговора, сказав, что хочет просто познакомиться, и не более того. При встрече он, проявляя большое уважение к нашей работе, связанной с разработкой новых элементов микроэлектроники, подчеркнул также и интерес к нашей идее о создании цифрового оптического компьютера и стал активно приглашать нас в Институт автоматики и электрометрии. Я мягко не соглашался, возможно не очень твердо, ссылаясь на уже имеющиеся договоренности с ИФП. Через два-три дня мне позвонил А.Ф. Кравченко и сказал, что Ю.Е. Нестерихин сообщил в Президиуме СО РАН, что мы приняли его предложение; в словах Кравченко было сожаление, а на высказанное мной удивление он сказал, что сейчас очень трудно будет что-либо переиграть. Через несколько дней у меня была беседа с С.Т. Васильевым, он также активно убеждал нас перейти в ИАЭ. Основными аргументами при принятии этого решения были планы Нестерихина придать ИАиЭ СО РАН физико-технический профиль, с приглашением на работу по возможности

большого числа физиков, а также разговор на интересную для меня тему о разработке оптического компьютера как одной из возможных основных тем Института.

Надо сказать, что ИАиЭ для нас был уже достаточно хорошо знаком. Нашу группу в Институте автоматики уже тогда связывали различные контакты. В те годы наши разработки в области микроэлектроники вызывали большой интерес со стороны сотрудников других институтов СО АН, к нам приходили и сотрудники Института автоматики и электрометрии (Цапенко М.П., Ильенков А. И., Гик Л. Д., Беломестных В.А. и др.). Летом 1965 г. М.П.Цапенко, ссылаясь на просьбу К.Б. Карандеева, пригласил нас срочно написать статью в новый журнал "Автометрия", посвященную использованию микроэлектронных приборов, в частности тонкопленочных диодов, в измерительной технике. Это приглашение было неожиданным - уже были куплены билеты на длительный отъезд из Новосибирска. Я успел набросать только черновой вариант и попросил нового сотрудника оформить эту работу. К. Б. Карандееву эта статья понравилась, и он заказал нам еще одну - по тонкопленочным конденсаторам. До этого из публикаций на тему тонкопленочных приборов у нас были только отчеты, тезисы и одна закрытая статья (по результатам конференции летом 1964 г. в Таганроге, где мы детально описывали все нюансы технологии изготовления тонкопленочных полевых транзисторов, аудитория была полностью заполнена, председательствовал В. И. Стафеев - известный ученый в области физики полупроводников). В эти времена В. И. Стафеев приезжал вместе с супругой по приглашению в Академгородок как потенциальный директор вновь создаваемого Института физики полупроводников, к организации которого мы прилагали определенные усилия. Стафееву городок понравился, его супруге нет - она также занималась наукой и не представляла свой переезд из Москвы. В 1964 г. В. И. Стафеев принял приглашение стать директором Института физических проблем в г. Зеленоград.

В 1965 -1966 гг. мы с лабораторией А.И.Ильенкова выполняли достаточно большую совместную хоздоговорную работу по созданию, методом анодного окисления, прецизионных тонкопленочных сопротивлений, точность получения заданного номинала была лучше 0,1% (на основе пленок титана и его окислов), ИАиЭ выполнял работы по разработке электронной части методики контроля за параметрами образцов. На основе этих работ мы написали две публикации (1966 г.), планировали также

написать и совместную книгу "Основы тонкопленочной схемотехники" - имелась предварительная договоренность с издательством "Энергия".

После перехода в ИАиЭ уже в течение 1972 г. я чувствовал, что ошибся с выбором института, здесь я не видел коллег, с которыми можно было бы вести дискуссии, обсуждать результаты работы и т.д. В то время в институт приходили новые сотрудники. Среди них был и Валерий Константинович Малиновский. При первой же встрече с Малиновским мы нашли общий язык и обнаружили близкое понимание вопросов, в том числе связанных с разработкой элементной базы оптических цифровых устройств. В итоге мы объединили наши коллективы в одну большую лабораторию 2-1, основной задачей которой стала разработка физико-технических принципов построения высокопроизводительного цифрового оптического компьютера.

Мы поставили перед собой задачу - понять, исходя из общих физических представлений, дает ли вообще какие-либо серьезные преимущества использование световых потоков в устройствах цифровой обработки информации по сравнению с электронными логическими устройствами. В итоге мы пришли к выводу, что основная роль оптики заключается не только в том, что возможно эффективное использование параллельных алгоритмов, но и в том, что возможна организация трехмерных логических связей, когда одновременный обмен информацией осуществляется между несколькими плоскостями и решается проблема соединений на поверхности логической микросхемы. Такая организация позволяет резко сократить число компонент вычислительных устройств, поднять их производительность, увеличить функциональные возможности, а также технологичность.

Одновременно мы рассматривали и различные физические подходы к созданию элементов памяти с оптическими входами и выходами и поняли, что в таких элементах нужно использование нелинейных физических эффектов (нужно усиление сигнала). Были сформулированы общие требования к оптическим логическим элементам и элементам оптической памяти, получены оценки их предельных параметров.

Одновременно мы рассматривали и различные физические подходы к созданию элементов памяти с оптическими входами и выходами, и поняли, что в таких элементах нужно использование нелинейных физических эффектов (нужно усиление сигнала). Были

сформулированы общие требования к оптическим логическим элементам и элементам оптической памяти, получены оценки их предельных параметров.

В 1972 г. по просьбе Ю. Е. Нестерихина был написан отчет "Исследование возможности физической реализации матричных оптических вычислительных устройств", в котором были сформулированы физико-технические принципы создания оптических логических элементов для матричных оптических вычислительных устройств, совокупность требований к таким элементам и сформулированы общие идеологические подходы к проблеме цифровой "оптический компьютер". Функционирование базового логического элемента, которое основано на модуляции светового потока электрическим полем, а логические сигналы распространяются по оптическим каналам связи, при этом (в отличие от классических оптронов) имеет место только одно преобразование энергии (свет - электрический сигнал) и источник светового потока - общий для множества элементов. Показана возможность создания таких логических элементов и вычислительных устройств на их основе средствами технологии современной микроэлектроники с введением только одной новой компоненты - тонкопленочного модулятора света.

В этом же году были созданы, несмотря на очень большие проблемы, связанные с передислокацией нашей экспериментальной базы (четыре крупные технологические установки и методики исследований), первые экспериментальные макеты оптических логических элементов и ячеек динамической памяти. Элементы базировались на использовании электрооптических кристаллов LiNbO_3 , в качестве источника света применялись газовые лазеры типа ЛГ-36, фотоприемников - фотосопротивления ФС-К1 и пленки CdSe . Составление логического элемента определяется

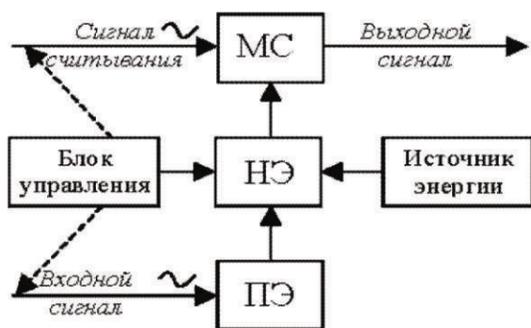


Рис. 1. Блок-схема универсального логического оптического элемента.

интенсивностью светового потока на выходе модулятора света (МС), которое однозначно связано с интенсивностью входного сигнала, поступающего на вход - фотоэлектрический преобразователь энергии (ПЭ) (состояние "0" или "1"), хранение информации (память элемента) в течение такта определяется накопителем энергии (НЭ); блок-схема такого элемента представлена на рис. 1.

В этих экспериментах было впервые получено квантование оптического сигнала и продемонстрирована возможность его распространения по сколь угодно длинной цепочке логических элементов при сохранении дискретного уровня входного сигнала. Они показали принципиальную возможность создания оптических логических элементов, в частности возможности реализации ими универсальной логической функции "стрелки Пирса".

В 1972 г. были начаты и работы по созданию тонких электрооптических пленок, как компонент таких элементов в интегральном исполнении, первая такая пленка была LiNbO_3 . Эти работы послужили основой для большого цикла исследований в ИАиЭ, направленных на внедрение сегнетоэлектричества в структуру интегральных схем. Позже мы разработали технологию получения пленок ниобата бария стронция (НБС) - одного из лучших электрооптических материалов, впервые сообщили о наблюдении продольного электрооптического эффекта в тонких пленках НБС с величиной электрооптического коэффициента, соизмеримого с его значениями в кристаллах НБС. Тонкопленочные структуры прозрачный электрод (ИТО) - пленка НБС - ИТО при модуляции светового потока импульсами $12 \div 15$ В имели глубину модуляции $80 \div 90$ %, при вращении плоскости поляризации ϕ света на $4 \div 5^\circ$. Такая величина ϕ достаточна для применения в оптических логических элементах.

В 1973 г. к работе над проблемой цифрового оптического компьютера подключились сотрудники ВЦ СО РАН С.В. Пискунов, Ю.Н. Корнеев, А. И. Мишин, С.В.Сергеев, в результате были сформулированы логические и алгоритмические основы построения однородных оптических вычислительных устройств для параллельной обработки информации, описан набор команд для управления работой клеточных автоматов и элементарных преобразований в окрестности каждого автомата, а также описана функциональная схема электрооптической вычислительной машины и набор команд для управления ее работой. Результаты этих исследований были отражены в 1973 г. в виде отчета

"Однородные универсальные электрооптические вычислительные машины".

Такой подход вызвал большой интерес со стороны наших коллег, отечественных и иностранных. Мы были постоянными участниками различных международных конференций, посвященных вопросам оптической обработки информации. На тему цифрового оптического компьютера выполнялись и хозяйственные работы, в частности для НИИ "Квант", г. Москва: "Исследование и разработка принципов построения высокопроизводительного матричного оптоэлектронного процессора" (1980 г.) и "Исследование физико-технологических возможностей построения тонкопленочного оптоэлектронного процессора" (1982 г.). В те годы тематика оптического компьютера регулярно отражалась в журнале "Автоматика", журнал постоянно имел следующие разделы: элементы 3-D интегральных схем с оптическими межсоединениями; среды для оптической памяти; элементы оптических устройств обработки и хранения информации; моделирование, расчет и применение оптоэлектронных устройств; методы построения оптоэлектронных устройств с оптическими межсоединениями. В 1989 и 1993 г. вышли тематические номера журнала, посвященные теме оптических вычислений, в которых нашли отражение работы, проводимые ИАиЭ СО РАН в указанной области. Позже, в 2004 г., была издана (с предисловием академика С.Н. Багаева) большая монография "3D лазерные информационные технологии", в которой собраны работы ИАиЭ, посвященные "оптической" тематике и объединенные единой идеей использования "трехмерного ресурса", в том числе рассматривались и проблемы построения 3D интегральных схем с оптическими межсоединениями. Тематика 3D интегральных схем в настоящее время становится все более актуальной, поскольку микроэлектроника достигает предельных параметров, когда закон Мура практически перестает "работать", и все большее число исследователей, разработчиков высокопроизводительных логических устройств видит возможность дальнейшего роста производительности в трехмерных микросхемах, в том числе с оптическими соединениями.

Анализ состояния современной элементной базы микроэлектроники показывает, что главным препятствием на пути дальнейшего повышения производительности вычислительных устройств является проблема соединений, как на поверхности отдельных кристаллов, так и между ними. В современных логических СБИС

площадь, занимаемая проводниками составляет около 70 % всей площади кристалла, общая длина проводников более чем в 10^3 раз превышает линейные размеры кристалла, энергия, затрачиваемая на перезарядку проводников, составляет до $60 \div 70$ % от всех энергетических потерь, размещение проводников по поверхности кристалла требует больших усилий, при этом практически достигнута предельная величина погонной емкости проводника 10^{-11} Ф/м. Кроме того, на системотехническом уровне выявляется проблема RC - задержек на соединениях. Замена алюминия медью в металлических слоях и окиси кремния на диэлектрик с меньшей диэлектрической проницаемостью позволяет уменьшить RC - задержки не более чем в $2 \div 5$ раз. Однако медные проводники необходимо покрывать слоем диэлектрика, и они для увеличения плотности размещения, имеют форму стенки с отношением ширины к высоте $1:4$, что не технологично. Кардинальным решением "RC - проблемы" был бы переход к такой архитектуре интегральной схемы, в которой отсутствовали бы "длинные" соединения, поскольку сложность логических устройств уже ограничивает, в конечном итоге, степень интеграции кристаллов уровнями существенно более низкими, чем могла бы позволить в пределах полупроводниковой технологии. В частности, в логических устройствах предельная степень интеграции на два - три порядка меньше по сравнению со степенью интеграции в матрицах памяти, причина заключается в более сложном характере соединений. Достигнутый к настоящему времени уровень интегральной технологии таков, что на изготовление соединений между функциональными элементами требуется не меньше технологических операций, чем на изготовление самих элементов.

Разработка принципов построения цифровых оптических компьютеров на протяжении 10-15 лет была в значительной мере идеологическим знаменем нашей лаборатории тонкопленочных сегнетоэлектрических структур и лаборатории 2-1. Когда в 1991 г. В.К. Малиновский рассказывал в кабинете Г.И.Марчука (тогда Президента АН СССР) о работах нашего Института в области оптических вычислительных технологий, то последний отметил, что в области электроники наша страна все более отстает от Запада, а в области оптических компьютеров мы еще можем составить достойную конкуренцию. Для этого были тогда все основания, и, прежде всего, высокий уровень научных исследований. Исходя из анализа

зарубежной литературы, посвященной развитию как направления оптической обработки информации, так и 3D интегральных схем с гальваническими связями, которые интенсивно разрабатываются в последние годы; можно полагать, что такая мысль правомочна и в настоящее время.

Значительное внимание в 1970-1980 гг. мы уделяли теоретическим вопросам, связанным с нестационарными электрофизическими процессами в тонких диэлектрических пленках. Прототипами для таких исследований служили классические работы А.И. Губанова, Э.И. Адировича, А. Manu и G.Rakavy, в которых построена на базе основных уравнений электродинамики и уравнений химической кинетики для переходов носителей заряда с разных энергетических уровней полная система дифференциальных уравнений, позволяющая описывать переходные процессы в диэлектриках и полупроводниках, с учетом ограничения тока объемным зарядом.

Результатами проведенных исследований явилась теория переходных токов в тонких диэлектрических слоях при ограниченном уровне монополярной инжекции. Было показано, что процесс установления стационарного значения тока осуществляется только по одному из шести механизмов, в зависимости от уровня инжекции, скорости захвата носителей заряда на локальные центры, формы первоначального заряда вблизи поверхности инжектирующего электрода. Установлено соотношение основных параметров, определяющих перенос заряда в диэлектрике, для всех шести механизмов и характерные признаки каждого из них. При этом вне зависимости от механизма переходного процесса можно выделить три четко определяемые стадии релаксации полного тока. Установлено, что в МДМ и МДП-структурах поведение переходного инжекционного тока определяется концентрацией носителей заряда на инжектирующем контакте. Граничные условия задают максимальную величину полного тока, продолжительность процесса экранировки и его механизм, закон распределения заряда в объеме образца на начальной стадии процесса, а также предопределяют возможность проявления пика тока в момент подхода облака носителей заряда к противоположному электроду.

Физико-технологические исследования, направленные на создание высококачественных сегнетоэлектрических пленок и ориентированные в 1972-1975 гг. преимущественно на изготовление тонкопленочных электрооптических модуляторов света, в последующие

годы определили становление нового научного направления, связанного с внедрением сегнетоэлектрических материалов в структуру интегральных схем. За это время был создан комплекс технологических установок для получения сегнетоэлектрических пленок (СП), разработана совокупность оригинальных методов исследования многослойных структур на их основе. Перечисляя в очень сжатой форме полученные в рамках данного направления результаты, можно отметить следующее:

- получены высококачественные сегнетоэлектрические пленки ниобата бария-стронция, а также LiNbO_3 , LiTaO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, PbZrTiO_3 по основным электрофизическим параметрам близкие к соответствующим параметрам монокристаллов;

- впервые в тонких сегнетоэлектрических пленках обнаружен электрооптический эффект и создан тонкопленочный модулятор света;

- на основе пленок $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$, модифицированных редкоземельными материалами, созданы многослойные структуры:

- элементов памяти (как постоянных, репрограммируемых электрическим полем, так и динамических) с параметрами, соответствующими лучшим результатам того времени в мире, в частности, накопительный конденсатор - элемент микросхем динамической памяти с произвольной выборкой, имеющий удельную емкость более 25 - 50 фФ/мкм² при времени саморазряда более 1с; в репрограммируемых элементах считывание информации осуществлялось как импульсами напряжения (наносекундный диапазон, число циклов записи - стирания более 10¹¹, без заметного изменения величины переключаемой поляризации), так и на основе пьезоэлектрических и электрооптических сигналов - в этом случае считывание информации является неразрушающим;

- обнаружен эффект усиления туннельного тока в М-СП-Д-П - структуре с туннельно-прозрачным диэлектриком в момент переключения поляризации в сегнетоэлектрике и создан низковольтный элемент постоянной памяти, репрограммируемый полем, превосходящий по параметрам МНОП - элементы памяти, наиболее применяемые в настоящее время;

- созданы не имеющие аналогов неохлаждаемые тонкопленочные пьезоэлектрические приемники (матрицы и линейки) дальнего ИК - излучения, в том числе быстродействующие, наносекундный диапазон, с минимальным временем отклика на воздействие излучения 10⁻¹¹-10⁻¹² с, время восстановления чувствительности приемника после воздействия импульсного излучения мощностью 100 кВт - не

Лаборатория тонкопленочных сегнетоэлектрических структур, 2002 г.
Стоят (слева направо)

1-й ряд:
В.В. Высочин,
Э.Г. Косцов,
И.Л. Багинский,
Л.Н. Стерелюхина,
В.М. Егоров.
2-й ряд:
В.Ф. Камышлов,
О.В. Жбанов,
А.Д. Лунев,
Э.Л. Кащеев,
А.А. Соколов.



более 30 мкс, приемники не требуют использования источников питания, либо последние не должны отличаться высокой стабильностью;

- создан элемент памяти на основе структуры пленка ВТСП-СП - электрод. В качестве материала ВТСП использовался Y-Ba-Cu-O, материала сегнетоэлектрика - цирконат титаната свинца, легированный стронцием. Установлена возможность управления с помощью процессов переключения поляризации в сегнетоэлектрике параметрами пленки ВТСП, находящейся в сверхпроводящем состоянии, длительность импульсов - 1 мкс, 10 В. Результат получен впервые.

По каждой из указанных задач постоянно имелись заказчики и успешно выполнялись соответствующие заказы, всего - более 25. Среди заказчиков были крупные организации, такие как ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, г.Москва, неоднократно; НИИ "Квант", г Москва, неоднократно; НПО "Электроника", г. Воронеж; Точприбор, неоднократно; НПО "Восток", г.Новосибирск, неоднократно; "Фиат", Италия. Кроме того работы выполнялись в рамках программ ГНТПР "Микроэлектроника" и различных интеграционных проектов и др. Общее число публикаций по указанной теме - более 300.

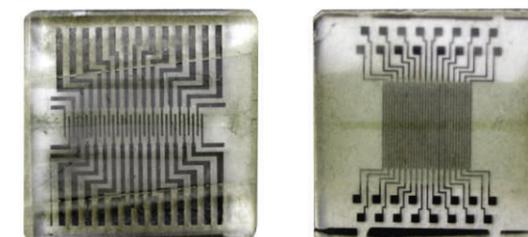
Одним из наиболее развивающихся секторов современной микроэлектроники, электронных микросхем, являются микроэлектромеханические системы (МЭМС). Основной элемент МЭМС - электромеханический преобразователь энергии.

В последние годы на основе сегнетоэлектрических пленок нами был разработан новый принцип электромеханического преобразования энергии, отличающийся значительно более высокой, по сравнению с известными используемыми в МЭМС аналогами, удельной энергоемкостью, более чем в 100 раз - до 1 Дж/м² и

более. Созданы микродвигатели, их отличие от классических электростатических микродвигателей с воздушным зазором между ротором и статором, определяется большой величиной диэлектрической постоянной указанных пленок (более 3000-4000), размещенных в рабочем зазоре микродвигателя. Эти двигатели имеют значительно более высокую мощность и могут развивать на старте силы до 0,01 - 0,1 Н/мм² поверхности, в первые (10 - 100 мкс действия напряжения).



Линейки, 2x8, электрооптических модуляторов света на основе пленок НБС, размер окна 100x100 мкм, шаг - 100 мкм. 1987 г.



Фрагменты линейки и матрицы 32x32 пьезоэлектрических приемников излучения. Размеры элементов 50x50 мкм, подложка - сапфир, электроды ИТО и Pt. Толщина пленки НБС - 3-5 мкм. 1987 г.



Э. Л. Кащеев



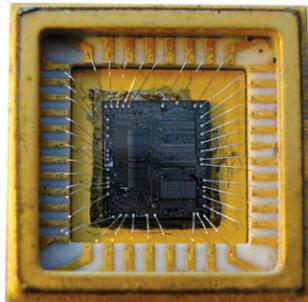
В. Ф. Камышов



И. Л. Багинский



В. В. Высочин

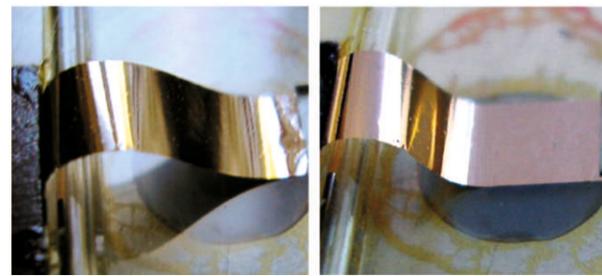
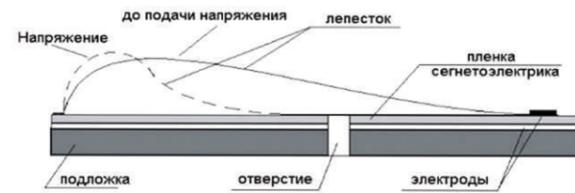


Матрицы конденсаторов динамической памяти с удельной емкостью 25 - 50 фФ/мкм², с НПО "Электроника", 1987 год.

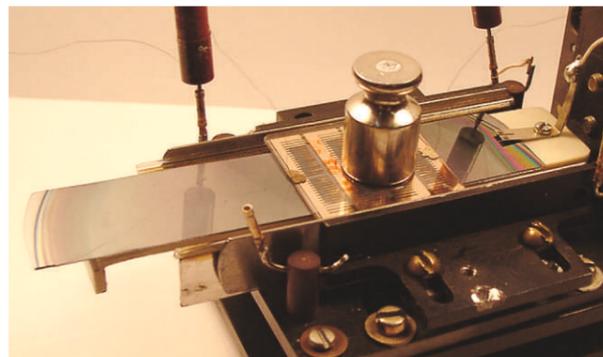
На основе указанного способа электромеханического преобразования энергии возможно построение не только силовых устройств, микродвигателей или микроактюаторов, но и принципиально других микроэлектронных конструкций. Одним из таких устройств является быстродействующий газовый микроклапан, принцип действия которого основан на перекрытии отверстия в пластине, на поверхности которой создана структура металл - сегнетоэлектрик, тонкой металлической пленкой, прижимающейся под давлением до 1000 атм. к поверхности сегнетоэлектрика силами электростатики, при включении импульса напряжения.

Некоторые из разработанных в лаборатории тонкопленочных сегнетоэлектрических структур элементов представлены в иллюстративном материале книги.

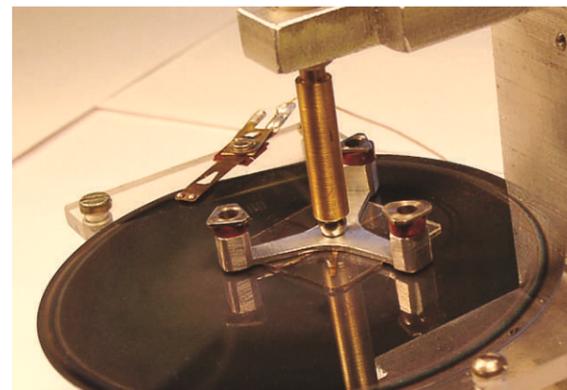
Электростатический микроклапан



Сборка тонкопленочных прецизионных сопротивлений на основе Ti TiO₂, 1966 год, совместно с ИАЭ.



Электростатический реверсивный микродвигатель (шаг 0.1 -10 мкм), структура Si -ITO -НБС - подвижный электрод, развивает силы более 0.3 Н, тактовая частота 1 - 10 кГц и более.



Электростатический двигатель вращения, на поверхности кремния.